



Technische  
Universität  
Braunschweig

Institut für Werkzeugmaschinen  
und Fertigungstechnik



# Strategische Technologieplanung am Beispiel der Automobilen Service Robotik

Stephan Herold

Schriftenreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und  
Fertigungstechnik der Technischen Universität Braunschweig





**Strategische Technologieplanung  
am Beispiel der Automobilen Service Robotik**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: M.Sc. Stephan Herold  
aus: Walsrode

eingereicht am: 16. Juli 2020  
mündliche Prüfung am: 10. Dezember 2020

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder  
Prof. Dr. Thomas S. Spengler  
Dr.-Ing. Daniel Schütz

### **Bibliografische Informationen der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2021

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

**ISBN 978-3-8027-8361-6**

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt, die dadurch begründeten Rechte, insbesondere der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Entnahme, vorbehalten.

©Vulkan-Verlag, Essen, 2021  
Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen und Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Waren- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Group Innovation der Volkswagen AG in den Jahren 2016 bis 2020 entstanden. In dieser Zeit bin ich vielen Personen begegnet, die mich unterstützt und diese Dissertation mitgestaltet haben. Ihnen allen möchte ich danken. Ein besonderer Dank geht an meinen Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder für seine fachliche Unterstützung, die jederzeit offenstehende Tür und seine interessierte und fundierte Betreuung. Ebenso danken möchte ich Prof. Dr. Thomas S. Spengler und Dr.-Ing. Daniel Schütz für die Erstellung der weiteren Gutachten sowie Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Meinen Vorgesetzten und Kollegen in der Volkswagen Group Innovation danke ich herzlich dafür, mich in diesem hochinteressanten Thema unterstützt zu haben. Ohne ihre Beiträge wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Außerordentlich danken möchte ich meinem fachlichen Betreuer für seine allgegenwärtige Unterstützung. Seine wertvollen und wegweisenden Ideen, Anregungen sowie seine fachliche Kompetenz haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Ein großer Dank gilt zudem meinen Studentinnen und Studenten, die mit viel Motivation, Ehrgeiz und Kompetenz diese Arbeit begleitet haben.

Zuletzt und von ganzem Herzen möchte ich meinen Eltern Uwe und Renate danken, die mich bei meinen Plänen zu jeder Zeit unterstützt haben. Besonders hervorheben möchte ich zudem meine Freundin Mareike, die mich in jeder Lebenslage unterstützt hat und auf viele gemeinsame Stunden verzichten musste.

Braunschweig, Dezember 2020  
Stephan Herold



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> . . . . .	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> . . . . .	<b>XIII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> . . . . .	<b>XV</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> . . . . .	<b>XVII</b>
<b>Kurzfassung und Abstract</b> . . . . .	<b>XXI</b>
<b>1 Einleitung</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation . . . . .	1
1.2 Motivation . . . . .	2
1.3 Defizit . . . . .	3
1.4 Zielstellung . . . . .	4
1.5 Lösungsansatz . . . . .	4
1.6 Aufbau der Arbeit . . . . .	5
<b>2 Automotive Service Robotics</b> . . . . .	<b>9</b>
2.1 Einführung in das automatisierte Fahren . . . . .	9
2.2 Motivation für Automotive Service Robotics . . . . .	10
2.2.1 Auswirkung automatisierter Fahrfunktionen . . . . .	11
2.2.2 Potenziale einer Automatisierung . . . . .	12
2.3 Abgrenzung von Automotive Service Robotics . . . . .	14
2.3.1 Definition und Einordnung in die Robotik . . . . .	14
2.3.2 Beispielapplikationen . . . . .	16
2.4 Spannungsfeld Automotive Service Robotics . . . . .	18
2.4.1 Anforderungen aus dem Technologiefeld . . . . .	20
2.4.2 Einordnung der Problemstellung . . . . .	22
2.5 Zusammenfassung . . . . .	22
<b>3 Methodische Grundlagen des Technologiemanagements und Handlungsbedarf</b> . . . . .	<b>25</b>
3.1 Begriffliche Grundlagen . . . . .	25
3.1.1 Technologie und Technik . . . . .	25
3.1.2 Produkt und Produktlebenszyklus . . . . .	27
3.1.3 Innovation und Invention . . . . .	28
3.2 Eingrenzung des Technologiemanagements . . . . .	29
3.3 Inhalte und Aufgaben des Technologiemanagements . . . . .	30
3.3.1 Technologiestrategie . . . . .	32
3.3.2 Technologieplanung . . . . .	34



3.4	Methoden des Technologiemanagements . . . . .	35
3.4.1	Klassische Methodenansätze . . . . .	36
3.4.2	Ausgewählte Forschungsansätze . . . . .	41
3.5	Bewertung bestehender Ansätze . . . . .	44
3.5.1	Bewertung klassischer Methodenansätze . . . . .	44
3.5.2	Bewertung ausgewählter Forschungsansätze . . . . .	47
3.6	Konkretisierung der Zielstellung . . . . .	49
3.7	Zusammenfassung . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Potenziale der Graphentheorie zur Anwendung im Technologiemanagement</b>	<b>53</b>
4.1	Grundlagen der Graphentheorie . . . . .	53
4.2	Analyseansätze der Graphentheorie . . . . .	59
4.2.1	Mikroanalyse . . . . .	59
4.2.2	Mesoanalyse . . . . .	61
4.2.3	Makroanalyse . . . . .	62
4.3	Strukturen zur Abbildung von Graphen . . . . .	63
4.4	Potenziale der Graphentheorie für die strategische Technologieplanung . . .	65
4.5	Zusammenfassung . . . . .	67
<b>5</b>	<b>Entwicklung eines Methodenansatzes</b> . . . . .	<b>69</b>
5.1	Grundlegender Aufbau des Methodenansatzes . . . . .	69
5.2	Informationsbeschaffungsphase . . . . .	72
5.2.1	Szenarien und Use Cases . . . . .	73
5.2.2	Funktionsbeschreibung . . . . .	76
5.2.3	Technologien und Konzepte . . . . .	78
5.3	Informationsverarbeitungsphase . . . . .	82
5.3.1	Datenschema . . . . .	83
5.3.2	Relationsmodell . . . . .	87
5.3.3	Technologiefeldgraph . . . . .	90
5.4	Informationsbewertungsphase . . . . .	93
5.4.1	Realisierbarkeit . . . . .	94
5.4.2	Wirtschaftlichkeit . . . . .	98
5.4.3	Relevanz . . . . .	101
5.4.4	Abhängigkeit . . . . .	107
5.4.5	Handlungsbedarf und Priorisierung . . . . .	110
5.4.6	Graphenvisualisierung . . . . .	115
5.4.7	Roadmapdefinition . . . . .	118
5.5	Erweiterbarkeit des Technologiefeldgraphen . . . . .	121
5.6	Zusammenfassung . . . . .	122
<b>6</b>	<b>Anwendung des Methodenansatzes für Automotive Service Robotics</b> . . . . .	<b>125</b>
6.1	Prototypische Umsetzung des Methodenansatzes . . . . .	126
6.2	Analyse des Technologiefelds Automotive Service Robotics . . . . .	130
6.3	Weiterentwicklung des Technologiefelds Automotive Service Robotics . . .	137
6.3.1	Technologieentwicklung . . . . .	138
6.3.2	Konzeptentwicklung . . . . .	140

6.4	Rückführung der Ergebnisse . . . . .	145
6.5	Zusammenfassung . . . . .	147
<b>7</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse . . . . .</b>	<b>149</b>
7.1	Anwendbarkeit . . . . .	149
7.2	Mehrwert . . . . .	151
7.3	Einsatzbereiche des Methodenansatzes . . . . .	155
7.3.1	Abgrenzung . . . . .	155
7.3.2	Limitationen . . . . .	157
7.4	Übertragbarkeit des Methodenansatzes . . . . .	158
7.5	Zusammenfassung . . . . .	161
<b>8</b>	<b>Schlussbetrachtung . . . . .</b>	<b>163</b>
8.1	Zusammenfassung . . . . .	163
8.2	Ausblick . . . . .	166
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>169</b>
<b>A</b>	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>185</b>
A.1	Entwicklungsstufen des automatisierten Fahrens . . . . .	185
A.2	Bedarf für angepasste Servicekonzepte in automatisierten Mobilitätssystemen . . . . .	186
A.3	Überblick verschiedener Kategorisierungsmerkmale für Technologien . . . . .	187
A.4	Ebenen des Technologiemanagements . . . . .	188
A.5	Vorgehen zur Bildung und Umsetzung der Technologiestrategie . . . . .	188
A.6	Technologiefrüherkennung . . . . .	189
A.7	Aufgaben der Technologieplanung . . . . .	190
A.8	Inhalte der Technologieentwicklung . . . . .	190
A.9	Inhalte der Technologieverwertung . . . . .	190
A.10	Inhalte des Technologieschutzes . . . . .	191
A.11	Inhalte der Technologiebewertung . . . . .	191
A.12	Allgemeine Anforderungen an das Technologiemanagement . . . . .	192
A.13	Erweitertes UML-Diagramm des Technologiefeldgraphen . . . . .	194
A.14	Wirtschaftlichkeitsberechnung der Use Cases . . . . .	194
A.15	Detaillierte Bestimmung von Handlungsbedarf und Priorisierung . . . . .	195
A.16	Übersicht der Bewertungsgrößen . . . . .	205
A.17	Attributzuweisung als Ergebnis der Informationsverarbeitungsphase . . . . .	210
A.18	Attributzuweisung als Ergebnis der Informationsbewertungsphase . . . . .	211
A.19	Liste potenzieller Szenarien für das Technologiefeld ASR . . . . .	212
A.20	Liste potenzieller Use Cases für das Technologiefeld ASR . . . . .	213
A.21	Patentanalyse des Technologiefelds Automotive Service Robotics . . . . .	215



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1	Laderoboter CARLA . . . . .	2
Abbildung 2.1	Auswirkungen automatisierter Fahrfunktionen auf die Fahrzeugnutzung	11
Abbildung 2.2	Ladekonzept E-SMARTCONNECT der VOLKSWAGEN KONZERNFORSCHUNG und KUKA . . . . .	12
Abbildung 2.3	Wirtschaftliche Potenziale unterschiedlicher Automatisierungsansätze in Produktionsanwendungen . . . . .	13
Abbildung 2.4	Abgrenzung des Technologiefelds Automotive Service Robotics . .	14
Abbildung 2.5	Beispielanwendungen für isolierte Automotive Service Roboter . . .	16
Abbildung 2.6	Beispielanwendungen für integrierte Automotive Service Roboter .	17
Abbildung 2.7	Zusammenfassung der Anforderungen und Bedarf für einen Methodenansatz . . . . .	22
Abbildung 3.1	Zusammenhang von Produkt, Funktion und Technologie . . . . .	28
Abbildung 3.2	Bestandteile eines Produktlebenszyklus . . . . .	28
Abbildung 3.3	Einordnung von Technologien und Innovationen in die Produktentstehung . . . . .	29
Abbildung 3.4	Abgrenzung des Technologiemanagements zum Innovations- und F&E-Management . . . . .	30
Abbildung 3.5	Phasen des Technologiemanagements . . . . .	31
Abbildung 3.6	Kontext der Technologiestrategie . . . . .	33
Abbildung 3.7	Funktionale und zeitliche Einordnung von strategischer und operativer Technologieplanung . . . . .	34
Abbildung 3.8	Aufbau einer S-Kurven-Analyse . . . . .	39
Abbildung 3.9	Strategien innerhalb eines Technologieportfolios . . . . .	40
Abbildung 3.10	Exemplarischer Aufbau einer Technologieroadmap . . . . .	40
Abbildung 3.11	Exemplarischer Aufbau einer Wechselwirkungsanalyse . . . . .	41
Abbildung 4.1	Exemplarische Darstellung eines Graphen . . . . .	54
Abbildung 4.2	Schematische Visualisierung verschiedener Graphentypen . . . . .	55
Abbildung 4.3	Aufbau von Adjazenz- und Inzidenzmatrix . . . . .	56
Abbildung 4.4	Darstellung dynamischer Graphen . . . . .	58
Abbildung 4.5	Analysemöglichkeiten der Graphentheorie auf Mikroebene . . . . .	60
Abbildung 4.6	Analysemöglichkeiten der Graphentheorie auf Mesoebene . . . . .	61
Abbildung 4.7	Exemplarischer Aufbau eines Property-Graphen . . . . .	64
Abbildung 4.8	Wechselwirkungsanalyse mit kräftebasierten Layoutverfahren . . . .	66
Abbildung 5.1	Übersicht über den eigenen Methodenansatz . . . . .	70
Abbildung 5.2	Ablauf der Informationsbeschaffungsphase . . . . .	72
Abbildung 5.3	Steckbrief Szenario . . . . .	74
Abbildung 5.4	Steckbrief Use Case . . . . .	76
Abbildung 5.5	Steckbrief Funktionsbeschreibung . . . . .	78
Abbildung 5.6	Ablauf der Technologieidentifikation . . . . .	79

Abbildung 5.7	Steckbrief Technologiebeschreibung . . . . .	80
Abbildung 5.8	Steckbrief Konzeptbeschreibung . . . . .	82
Abbildung 5.9	Ablauf der Informationsverarbeitungsphase . . . . .	83
Abbildung 5.10	Datenschema des Technologiefeldgraphen . . . . .	84
Abbildung 5.11	Relationsmodell des Technologiefeldgraphen in UML-Darstellung .	87
Abbildung 5.12	Exemplarischer Aufbau und Beschreibung eines Technologiefeldgraphen durch Datenmodell und Relationsmatrizen . . . . .	91
Abbildung 5.13	Ablauf der Informationsbewertungsphase . . . . .	93
Abbildung 5.14	Ablauf der Realisierbarkeitsbewertung . . . . .	98
Abbildung 5.15	Ablauf der praktischen Wirtschaftlichkeitsbewertung . . . . .	100
Abbildung 5.16	Vereinfachter Aufbau der Relevanzbewertung . . . . .	101
Abbildung 5.17	Aufbau der Relevanz- und Abhängigkeitsbewertung . . . . .	109
Abbildung 5.18	Vorgehen zur Priorisierung . . . . .	113
Abbildung 5.19	Vorgehen zur Bestimmung des Handlungsbedarfs . . . . .	114
Abbildung 5.20	Visualisierung eines exemplarischen Technologiefeldgraphen . . . .	117
Abbildung 5.21	Ableitung einer Technologieroadmap aus dem Technologiefeldgraphen	120
Abbildung 6.1	Vorgehen zur Validierung des Methodenansatzes . . . . .	125
Abbildung 6.2	Umsetzung des Methodenansatzes . . . . .	126
Abbildung 6.3	Definition von Knotenattributen und Kanten für das Datenschema .	127
Abbildung 6.4	Umsetzung der Visualisierung in GEPHI . . . . .	129
Abbildung 6.5	Identifikation von Szenarien und Use Cases für Automotive Service Robotics . . . . .	131
Abbildung 6.6	Ergebnisdokumentation im Rahmen der Workshops . . . . .	132
Abbildung 6.7	Technologiefeldgraph für Automotive Service Robotics . . . . .	134
Abbildung 6.8	Roadmap für das Technologiefeld Automotive Service Robotics . .	136
Abbildung 6.9	Mustererkennung am Beispiel der Ladeschnittstelle . . . . .	139
Abbildung 6.10	Auswirkungen der Technologieentwicklung . . . . .	139
Abbildung 6.11	Funktionsmuster eines Laderoboters für Privatgaragen . . . . .	141
Abbildung 6.12	Funktionsmuster für einen Reinigungsmulticopter . . . . .	142
Abbildung 6.13	Auswirkung der Konzeptentwicklung . . . . .	143
Abbildung 6.14	Funktionsmuster für einen Parkroboter . . . . .	144
Abbildung 6.15	Auswirkung der Parkroboterentwicklung . . . . .	145
Abbildung 6.16	Weiterentwicklung des Technologiefelds Automotive Service Robotics	146
Abbildung 7.1	Exemplarische Anwendung des Ansatzes auf das Technologiefeld auto- matisiertes Fahren . . . . .	160
Abbildung 7.2	Exemplarische Anwendung des Ansatzes auf das Technologiefeld auto- mobile Endmontage . . . . .	161
Abbildung 8.1	KUKA Ladeassistent . . . . .	168
Abbildung A.1	Erweitertes UML Diagramm der Klassen im Graphen . . . . .	194
Abbildung A.2	Patentanalyse des Technologiefelds Automotive Service Robotics . .	215

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1	Aufbau der Arbeit . . . . .	6
Tabelle 3.1	Übersicht verschiedener Technologiereifegrade nach Definition der NASA	27
Tabelle 3.2	Kategorisierung und Vergleich verschiedener Methoden des Technologiemanagements . . . . .	37
Tabelle 3.3	Bewertung klassischer Methodenansätze vor dem Hintergrund des Spannungsfelds ASR . . . . .	45
Tabelle 3.4	Bewertung ausgewählter Forschungsaktivitäten vor dem Hintergrund des Spannungsfelds ASR . . . . .	47
Tabelle 3.5	Kombination geeigneter Methoden . . . . .	50
Tabelle 5.1	Technologiereifegrad nach eigener Definition . . . . .	75
Tabelle 5.2	Bewertungsgrößen des Datenschemas . . . . .	86
Tabelle 5.3	Übersicht der Relationsmatrizen . . . . .	89
Tabelle 5.4	Kenngrößenübersicht der Relevanzbewertung . . . . .	106
Tabelle 5.5	Logik der Priorisierung . . . . .	112
Tabelle 7.1	Bewertung der Anwendbarkeit des Methodenansatzes . . . . .	150
Tabelle 7.2	Mehrwert des Methodenansatzes gegenüber bestehenden Ansätzen . .	152
Tabelle 7.3	Zeitliche und funktionale Ausrichtung des Methodenansatzes im Technologiemanagement . . . . .	156
Tabelle A.1	Übersicht verschiedener Stufen des automatisierten Fahrens nach Society of Automotive Engineers (SAE) J3016 . . . . .	185
Tabelle A.2	Mögliche Klassifikationsmerkmale von Technologie . . . . .	187
Tabelle A.3	Ebenen des Technologiemanagements . . . . .	188
Tabelle A.4	Differenzierung von strategischer und operativer Technologieplanung .	190
Tabelle A.5	Aufgaben und Phasen der Technologiebewertung . . . . .	192
Tabelle A.6	Übersicht der Bewertungsgrößen der Szenarien . . . . .	205
Tabelle A.7	Übersicht der Bewertungsgrößen der Use Cases . . . . .	206
Tabelle A.8	Übersicht der Bewertungsgrößen der Funktionen . . . . .	207
Tabelle A.9	Übersicht der Bewertungsgrößen der Technologien . . . . .	208
Tabelle A.10	Übersicht der Bewertungsgrößen der Konzepte . . . . .	209
Tabelle A.11	Attributzuordnung in der Informationsverarbeitung . . . . .	210
Tabelle A.12	Attributzuordnung in der Informationsbewertung . . . . .	211
Tabelle A.13	Liste identifizierter Szenarien . . . . .	212
Tabelle A.14	Liste potenzieller Use Cases Teil 1 . . . . .	213
Tabelle A.15	Liste potenzieller Use Cases Teil 2 . . . . .	214



# Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr
ÖPV	öffentlicher Personenverkehr
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
Abb.	Abbildung
Abk.	Abkürzung
AC	Average Current, zu deutsch Wechselstrom
ACC	Adaptive Cruise Control
AFF	Automatisierte Fahrfunktionen
AHP	Analytischer Hierarchieprozess
AMoD	Automatisierte Mobility on Demand
AR	Augmented Reality
ASR	Automotive Service Robotics
back end	Datenbankschicht, in welcher Daten gespeichert sind
BFS	Breadth-first search, zu deutsch Breitensuche
CCS	Combined Charging System
CSV	Comma separated values
DC	Direct Current, zu deutsch Gleichstrom
DFS	Depth-first search, zu deutsch Tiefensuche
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIN	Deutsches Institut für Normung
FAS	Fahrerassistenzsysteme
FK	Fertigungskosten
front end	Datenbankschicht, in welcher Daten eingegeben werden
Fzg.	Fahrzeug
F&E	Forschung und Entwicklung
GEXF	Graph Exchange XML Format
GPS	Global Positioning System
HITS	Hypertext-induced Topic Selection
HK	Herstellkosten



---

IMU	Inertial Measurement Unit, zu deutsch Inertiale Messeinheit
IPC	International Protection Code, zu deutsch Schutzklasse
LiDAR	Light Detection and Ranging
LKW	Lastkraftwagen
MaaS	Mobility as a Service
MK	Materialkosten
MoD	Mobility on Demand
mon.	monetär
MRK	Mensch-Roboter-Kollaboration
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NFA	Need for action, zu deutsch Handlungsbedarf
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
PKW	Personenkraftwagen
Pose	Position und Orientierung im dreidimensionalen Raum
QFD	Quality Function Deployment
SAE	Society of Automotive Engineers
SWOT	Strengths Weaknesses Opportunities Threats
Tab.	Tabelle
TCO	Total Cost of Ownership
tech.	technologisch
TFG	Technologiefeldgraph
Toolchain	Kombination verschiedener Software-Anwendungen
TRIZ	russisches Akronym für Theorie des erfinderischen Problemlösens
TRL	Technology Readiness Level, zu deutsch Technologiereifegrad
TU	Technische Universität
UML	Unified Modeling Language
VBA	Visual Basic for Applications
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
vgl.	vergleiche
www	World-Wide-Web
XML	Extensible Markup Language

# Symbolverzeichnis

## Allgemeine Anmerkungen zur Symbolik

Im Rahmen dieser Arbeit wird die allgemein übliche Form der Symbolik aus dem Themenfeld der Robotik verwendet. Zur besseren Unterscheidung werden Vektoren und Skalare kursiv dargestellt. Für die Beschreibung von Matrizen werden fett gedruckte Großbuchstaben verwendet. Eigennamen werden im Rahmen der Arbeit durch Kapitälchen hervorgehoben.

## Skalare

Notation	Beschreibung
$C_i^d$	Gradzentralität eines Knoten $v$
$d_G(v)$	Knotengrad eines Knoten $v$
$d_G^+(v)$	Eingangsgrad eines Knoten $v$ in einem gerichteten Graph
$d_G^-(v)$	Ausgangsgrad eines Knoten $v$ in einem gerichteten Graph
$\langle d \rangle$	Mittlerer Knotengrad eines Graphen $G$
$f$	Gelenkfreiheit
$F$	Freiheitsgrad einer kinematischen Struktur
$g$	Anzahl der Gelenke
$G$	Anzahl der Strukturglieder
$k$	Länge eines Wegs $P_n$
$n_E$	Anzahl der Kanten eines Graphen
$n_F$	Anzahl an Knoten der Kategorie Funktion
$n_K$	Anzahl an Knoten der Kategorie Konzept
$n_S$	Anzahl an Knoten der Kategorie Szenario
$n_T$	Anzahl an Knoten der Kategorie Technologie
$n_U$	Anzahl an Knoten der Kategorie Use Case
$n_V$	summierte Knotenanzahl über alle Kategorien
$\rho(G)$	Dichte eines Graphen $G$
$\sigma_d$	Standardabweichung des mittleren Knotengrads $\langle d \rangle$
$w$	Gewichtung einer Kante $v$
$x, y, z$	Positionskoordinaten im Raum
$\vartheta, \psi, \varphi$	Orientierungskoordinaten im Raum

## Vektoren

Notation	Beschreibung
$Dep$	Abhängigkeit
$HK$	Herstellkosten

## Matrizen

Notation	Beschreibung
$A(G)$	Adjazenzmatrix eines Graphen $G$
$^F A_U$	Relationsmatrix Funktion-Use Case-Ebene
$^K A_S$	Relationsmatrix Konzept-Szenario-Ebene
$^K A_U$	Relationsmatrix Konzept-Use Case-Ebene
$^T A_F$	Relationsmatrix Technologie-Funktion-Ebene
$^T A_K$	Relationsmatrix Technologie-Konzept-Ebene
$^U A_S$	Relationsmatrix Use Case-Szenario-Ebene
$^F A_S$	indirekte Relationsmatrix Funktion-Szenario-Ebene
$I(G)$	Inzidenzmatrix eines Graphen $G$
<b>NFA</b>	Handlungsbedarf
<b>Prio</b>	Priorität
<b>REL</b>	Relevanz
<b>HK</b>	Herstellkosten (abhängig von Zeitpunkt und Szenario)
<b>TRL</b>	Technologiereifegrad
$\mathbf{0}_{nm}$	Nullmatrix mit $n \times m$

## Mengen

Notation	Beschreibung
$E$	Kantenmenge eines Graphen $G$
$F$	Teilmenge der Funktionen $F \subseteq V$ im Technologiefeldgraphen $G$
$G$	Graph
$K$	Teilmenge der Konzepte $K \subseteq V$ im Technologiefeldgraphen $G$
$K_{\text{intern}}$	Teilmenge $K_{\text{intern}} \subseteq K$ der unternehmensintern entwickelten Konzepte
$P_n$	Weg durch einen Graphen

$S$	Teilmenge der Szenarien $S \subseteq V$ im Technologiefeldgraphen $G$
$T$	Teilmenge der Technologien $T \subseteq V$ im Technologiefeldgraphen $G$
$U$	Teilmenge der Use Cases $U \subseteq V$ im Technologiefeldgraphen $G$
$V$	Knotenmenge eines Graphen $G$

## Operatoren

Notation	Beschreibung
$\forall$	Für alle Elemente
$>$	größer als
$<$	kleiner als
$\max()$	Maximalwert eines Vektors/einer Matrix
$\bar{()}$	Mittelwert eines Vektors/einer Matrix
$\min()$	Minimalwert eines Vektors/einer Matrix
$\hat{()}$	Minimalwert eines Vektors/einer Matrix
$\cap$	Schnittmenge
$\subset$	Teilmenge
$\approx$	ungefähr
$\cup$	Vereinigungsmenge

## Subskripte und Superskripte

Notation	Beschreibung
$()^X$	Aktive Abhängigkeit von Ebene X des Technologiefeldgraphen
$()^{\max}$	maximaler Wert
$()^{\min}$	minimaler Wert
$O_{\text{gef}}$	geforderter Wert
$O_{\text{kum}}$	kumulierter Wert
$O_{\text{mon}}$	monetär
$O_{\text{norm}}$	normalisierter Wert
$O_Y$	Passive Abhängigkeit von Ebene Y des Technologiefeldgraphen
$O_{\text{real}}$	realistischer Wert
$O_{\text{tech}}$	technologisch
$O_{\text{theo}}$	theoretischer Wert



# Kurzfassung

Im Technologiefeld der Automobilen Service Robotik werden innovative Robotersysteme für Service- und Wartungstätigkeiten an automatisiert fahrenden Fahrzeugen untersucht. Um die wirtschaftlichen und technologischen Zielstellungen in den zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten ressourceneffizient bearbeiten zu können, müssen im Rahmen des Technologiemanagements frühzeitig strategisch wichtige Handlungsbedarfe aufgedeckt und für die Technologieplanung bewertet werden. Insbesondere innovative Technologiefelder, wie das der Automobilen Service Robotik, befinden sich in frühen Reifegradphasen in einem Spannungsfeld aus Unsicherheiten in der Potenzialabschätzung, interdisziplinären Abhängigkeiten zwischen Technologieprojekten und hoher Entwicklungsdynamik technischer und wirtschaftlicher Leistungsparameter. Bestehende Ansätze zur strategischen Technologieplanung weisen durch ihren meist intuitiven Charakter Defizite in der Berücksichtigung von vielschichtigen Abhängigkeiten zwischen Einzelprojekten und dynamischen Reifegradentwicklungen auf. Eine effiziente und projektübergreifende Bewertung von Handlungsalternativen im Sinne der Technologiestrategie ist somit nicht möglich. Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen strukturierten Ansatz zur Planung von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten für innovative Technologiefelder mit komplexen dynamischen Wechselwirkungen zu schaffen, der eine Priorisierung von Handlungsalternativen auf Technologieebene ermöglicht und die strategische Ausrichtung unterstützt.

Aufbauend auf den spezifischen Eigenschaften des Technologiefelds der Automobilen Service Robotik und der Analyse bestehender Ansätze werden allgemeingültige Anforderungen an einen neuartigen Methodenansatz für die strategischen Technologieplanung abgeleitet. Es wird ein mehrstufiger Ansatz entwickelt, der auf der Wechselwirkungsanalyse aufbaut, diese um Ansätze der Graphentheorie erweitert und mit der Methodik des Technologieroadmappings kombiniert. Im Rahmen des zyklisch aufgebauten Methodenansatzes werden zunächst relevante Einsatzszenarien zukünftiger Produkte identifiziert und mögliche Anwendungsfälle in ihrer funktionalen Struktur beschrieben. Somit werden externe Einflüsse, Randbedingungen und technische Anforderungen an das Technologiefeld in einer lösungsneutralen Darstellung dokumentiert. Die funktionale Beschreibung der Anwendungsfälle ermöglicht ferner die Identifikation umsetzungsrelevanter Technologien und bestehender Konzepte. Ein Relationsmodell zur Abbildung technologischer, zeitlicher und monetärer Abhängigkeiten verknüpft die identifizierten Elemente miteinander, überführt das Technologiefeld in eine dynamische Graphendarstellung und strukturiert die Informationsgrundlage. Durch die Verwendung erweiterter Ansätze der Wechselwirkungsanalyse wird die technologische Realisierbarkeit von Einsatzszenarien und Anwendungsfällen systematisch untersucht, die Relevanz von einzelnen Technologieprojekten bestimmt und der Handlungsbedarf durch den Abgleich von Anforderungen und Potenzialen abgeleitet.

Die Validierung des Methodenansatzes erfolgt anhand der exemplarischen Anwendung auf das Technologiefeld der Automobilen Service Robotik. Durch den entwickelten Ansatz lassen sich frühzeitig Bedarfe sowie die entsprechenden Maßnahmen für die Technologieentwicklung priorisieren. Ferner werden zeitliche Abhängigkeiten der Forschungs- und Entwicklungsprojekte dokumentiert und Entscheidungsträger in der Operationalisierung der Technologiestrategie unterstützt.



# Abstract

Automotive Service Robotics is a new research topic in the field of robotics. Motivated by the ongoing trend of automated driving, innovative robot systems for service and maintenance tasks on automated vehicles are investigated. In order to address the economic and technological objectives in future research and development activities in a resource-efficient manner, strategically important needs for action must be identified and evaluated in an early stage as part of the technology management. Especially innovative technology fields, such as Automotive Service Robotics, are in an early stage of maturity in a conflict of aims between high uncertainties in the assessment, interdisciplinary dependencies between technology projects and high development dynamics of technical and economic performance parameters. Existing approaches in the field of strategic technology planning have major deficits in the consideration of complex dependencies between individual projects and dynamic maturity developments due to their mostly intuitive character. An efficient and cross-project evaluation of alternative courses of action in the sense of an overarching technology strategy is therefore not possible. The aim of this thesis is to create a structured approach for planning research and development activities in innovative technology fields with complex dynamic interactions, which enables prioritization of alternative courses of action at a technology level and thus supports the strategic alignment.

Based on the specific properties of Automotive Service Robotics technology and the analysis of existing approaches, general requirements for a new method approach for strategic technology planning are derived. To support the planning process, a multi-level approach is developed. This approach is based on the principles of cross-impact analysis and technology roadmapping, augmented by elements from the mathematical field of graph theory. In the first step of the cyclical approach, relevant application scenarios for future products are identified and possible applications are described in their functional structure. This way external factors, boundary conditions and technical requirements for the technology field are documented in an abstract representation. Through the abstraction of a functional description for each use case, potentially applicable technologies and existing products can be identified. A relationship model for mapping technological, temporal and financial dependencies links the identified elements with each other, converts the technology field into a dynamic graph representation and structures the information. Using adapted approaches of graph theory, the technological feasibility of scenarios and use cases can be examined. Furthermore, the relevance of technologies is determined and a need for action can be derived by balancing requirements and technological potentials. The relevant deficits are thus assessed in a structured manner at an early stage and the results documented in a roadmap.

The developed approach is validated using an exemplary application for the field of Automotive Service Robotics. Relevant needs and the corresponding measures for technology development can be prioritized at an early stage and product development activities are supported. As a result the technology of optical pattern recognition is identified as essential and developed based on the requirements of the relevant scenarios linked in the graph representation. Furthermore, temporal dependencies of the research and development projects are documented and decision-makers are supported in the operationalization of their technology strategy.





# 1 Einleitung

Die Entwicklung von automatisierten Fahrfunktionen bis hin zum vollautomatisierten Fahren wird als eine disruptive Entwicklung in der Automobilbranche gesehen [92, 97, 188]. So bewirkt in aktuellen Fahrzeuggenerationen eine automatische Abstandsregelung, dass ein Mindestabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug eingehalten wird, und ein Spurhalteassistent warnt durch Vibration des Lenkrades, wenn ein Auto die Fahrbahnrandmarkierung überfährt. Die fortschreitende Entwicklung solcher Systeme sorgt für zusätzlichen Komfort und ein erhöhtes Maß an Sicherheit während der Fahrt. Experten erwarten, dass bereits in den nächsten Jahren erste Fahrzeuge mit automatischen Fahrfunktionen am Markt verfügbar sein werden [7]. Hierdurch wird sich die Rolle des Fahrers fundamental ändern. Während in aktuellen Fahrzeuggenerationen die vollständige Fahraufgabe übernommen werden muss, fungiert der Mensch in der letzten Ausbaustufe des automatischen Fahrens ausschließlich als Passagier [93]. Somit sind auch neue Fahrzeugnutzungskonzepte denkbar, sowohl in der privaten als auch in der kommerziellen Anwendung. Beispiele für solche Nutzungskonzepte sind vollautomatisierte Mobilitätssysteme, in denen durch eine Automatisierung des Carsharingkonzepts Personenkraftwagen (PKW) den Nutzern bedarfsorientiert zur Verfügung gestellt werden. Aber auch die Automatisierung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) oder von Lastkraftwagen (LKW) werden als Einsatzbereiche für automatisierte Fahrfunktionen betrachtet [92]. Als Potenziale automatisierter Fahrfunktionen werden sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Faktoren gesehen. Durch den Entfall des Fahrers im ÖPNV [11] und im Bereich des Güterverkehrs [46] wird beispielsweise eine Reduktion der Betriebskosten erwartet. Ferner lässt sich durch die Automatisierung von Mobilitätssystemen eine höhere Auslastung der Fahrzeuge realisieren, was eine Reduzierung der Verkehrsbelastung [49] und Fahrzeugemissionen [66, 173] zur Folge hat.

## 1.1 Ausgangssituation

Durch den Entfall des Fahrers im kommerziellen Kontext bzw. durch den Wandel des Fahrers zum Passagier im privaten Kontext der Fahrzeugnutzung ergeben sich neue Herausforderungen für die Automobilindustrie. Neben der Fahraufgabe übernimmt der Fahrer heutzutage ergänzende Tätigkeiten. In der privaten Nutzung können die Befüllung mit Betriebsstoffen, die Reinigung oder Betankung des Fahrzeugs genannt werden. In der kommerziellen Nutzung werden zusätzlich Tätigkeiten wie eine regelmäßige Wartung oder die Ladungssicherung im Güterverkehr benötigt [11]. Diese Tätigkeiten werden auch in Zukunft bei Fahrzeugen mit automatisierten Fahrfunktionen bestehen bleiben, sowohl in der privaten als auch in der kommerziellen Nutzung. Um das vollständige Potenzial von automatisierten Fahrfunktionen nutzen zu können, wird ein Bedarf für angepasste Servicekonzepte entstehen [47].

Durch eine Entlastung des Kunden von ergänzenden Tätigkeiten kann eine Komfortsteigerung erreicht und eine vollumfänglich automatisierte Mobilität ermöglicht werden, in der auch sämtliche Aktivitäten abseits des Fahrens automatisiert durchgeführt werden. Jedoch müssen hierzu Fahrzeughersteller neue Servicekonzepte bereitstellen. In der kommerziellen Nutzung bestehen

ebenfalls Potenziale für solche Konzepte. So zeigen *Bösch et. al.* [11] auf, dass für die Akzeptanz von automatisierten Mobilitätssystemen die Reinigung und Wartung der Fahrzeuge eine zentrale Rolle einnehmen und hierfür kosteneffiziente Lösungen zu entwickeln sind. Auch die Fahrzeugverfügbarkeit ist direkt ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit von zukünftigen Mobilitäts- und Transportsystemen. Automobilhersteller stehen vor der Herausforderung, zukünftige Fahrzeuggenerationen mit automatisierten Fahrfunktionen durch angepasste Servicekonzepte zu ergänzen, um dem Kunden in der privaten Nutzung eine Komfortsteigerung zu bieten und in der kommerziellen Nutzung den wirtschaftlichen Betrieb der Fahrzeuge zu gewährleisten.

## 1.2 Motivation

Eine Möglichkeit die entstehenden Bedarfe für angepasste Servicekonzepte zu decken, stellt der Einsatz von Automatisierungstechnik und Robotik dar. Von verschiedenen Unternehmen der Automobilindustrie wird bereits die Entwicklung aufgabenspezifischer Applikationen verfolgt und durch erste Demonstratoren eine Machbarkeit verschiedener Anwendungsfälle aufgezeigt. In Abbildung 1.1 ist beispielhaft der Laderoboter CARLA der VOLKSWAGEN AKTIENGESELLSCHAFT dargestellt [190]. Dieses Roboterkonzept ermöglicht einen vollautomatisierten Ladevorgang für batterieelektrische Fahrzeuge im öffentlichen Raum. Das automatisierte Parken, z. B. in Parkhäusern, wird eine der ersten Ausprägungen in der Entwicklung von automatisierten Fahrfunktionen darstellen [197]. Um ebenfalls eine automatisierte Ladefunktion zu realisieren, übernimmt der Roboter das Einstecken des Ladekabels. Ziel ist es, dem Kunden ein komfortables Parken und Laden zu ermöglichen. Hierzu ist der Roboter in der Lage, selbstständig im Parkhaus zu navigieren und über die vorhandene Ladeinfrastruktur parkende Fahrzeuge elektrisch zu laden.



**Abbildung 1.1:** Laderoboter CARLA [190]

Die Entwicklungen solcher Konzepte sind neben dem akuten Bedarf für angepasste Servicekonzepte auch durch fortschreitende Entwicklungen im Bereich der Robotik motiviert. Hier werden insbesondere im Bereich der Service Robotik alternative Anwendungsbereiche für Automatisierungslösungen erschlossen. Der Fokus der Applikationen liegt nicht mehr ausschließlich in der industriellen Anwendung für Fertigungs- und Montageaufgaben. Auch Einsatzbereiche außerhalb der Industrie, wie im Heimanwenderbereich, sind durch einen stetigen Zuwachs geprägt [67, 68]. Sinkende Preise und eine steigende Akzeptanz in der Bevölkerung begünstigen diese Trendwende [22].

Durch den Einsatz von Industrie- und Servicerobotern zur Automatisierung von fahrzeugorientierten Servicetätigkeiten besteht die Möglichkeit, automatisierte Fahrfunktionen sinnvoll zu ergänzen. In der privaten Nutzung kann dem Endkunden ein gesteigertes Maß an Komfort geboten und in der kommerziellen Nutzung die Wirtschaftlichkeit durch eine Automatisierung stark repetitiver Servicetätigkeiten gesteigert werden. Der Entfall des Fahrers würde alternativ zu einem zusätzlichen Personalbedarf für Reinigungs-, Service- oder Wartungstätigkeiten führen. Technologieentwicklungen im Bereich der Robotik und Automatisierungstechnik eröffnen hierbei eine steigende Anzahl von Einsatzmöglichkeiten.

### 1.3 Defizit

Aufgabe des Technologiemanagements ist es, die Unternehmenskompetenzen in einer Form zu entwickeln, dass die richtigen Technologien zum richtigen Zeitpunkt für die Produktentstehung zur Verfügung stehen, um den langfristigen Unternehmenserfolg zu sichern. Somit wird durch das Technologiemanagement die Ausrichtung des Unternehmens für zukünftige Produkte gesteuert. Insbesondere das strategische Technologiemanagement fokussiert die langfristige Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens. Hierzu ist es bereits in früher Phase notwendig, unternehmensrelevante Technologien zu identifizieren und ihre Entwicklung zu steuern. [19, 150, 151, 207]

Der Einsatz von Robotik und Automatisierungstechnik im After-Sales-Bereich zur Umsetzung von Servicetätigkeiten stellt eine neue Kategorie der Service Robotik dar, die durch eine Vielzahl von neuen Randbedingungen geprägt ist. Einerseits eröffnen sich durch die stetige Entwicklung von automatisierten Fahrfunktionen eine Vielzahl von Anwendungsfällen, in denen die Automatisierung von fahrzeugorientierten Servicetätigkeiten einen Vorteil bieten kann [47]. Andererseits ist das Technologiefeld der Service Robotik, wie auch angrenzende Technologiefelder, durch eine hohe Entwicklungsdynamik geprägt [68]. Somit entwickeln sich marktseitige Bedarfe für neue Applikationen, die durch neuartige Anwendung von Robotik in wenig strukturierten und offenen Einsatzumgebungen ein komplexes Anforderungskollektiv aufweisen. Technologiseitig entstehen neue Potenziale diese Bedarfe zu decken. Um diese neu entstehenden Anforderungen an die Robotik zielgerichtet zu bearbeiten und mit den technologischen Potenzialen abzugleichen, müssen technologische Whitespots sowie Schlüsseltechnologien identifiziert und in der Technologieentwicklung priorisiert werden. Unter Whitespots sind Marktbereiche zu verstehen, die nur wenig mit dem aktuellen Technologieangebot bedient werden können [162].

Ein solcher Technologieentscheid im Zusammenwirken aus möglichen Anwendungsfällen und Technologiepotenzialen ist jedoch durch die Komplexität des Themenfelds nicht intuitiv möglich. Das Portfolio befindet sich in einem Spannungsfeld zwischen operativen und strategischen Entscheidungen. Zum einen muss das „richtige“ Technologieportfolio an der Unternehmensstrategie effektiv ausgerichtet werden. Zum anderen muss die Abwicklung der Entwicklungsprojekte auf operativer Ebene möglichst effizient erfolgen. Die Priorisierung der richtigen Technologieentwicklungsprojekte setzt eine systematische Betrachtung der Abhängigkeiten und Wechselwirkungen innerhalb des Themenfelds voraus.

Neben der Priorisierung von Technologieprojekten gilt es auch, das gesamte Themenfeld an der Unternehmensstrategie auszurichten. Daher muss frühzeitig die Umsetzbarkeit der Anwendungsfälle bewertet werden. Eine intuitive Abschätzung ist durch die unbekannten Wirkbeziehungen

zwischen Anwendungsfällen und Technologien nicht zielführend und eine systematische Betrachtung Voraussetzung für ein effektives Technologiemanagement. Es gilt zu bewerten, welche Technologien für welche Anwendungsfälle relevant sind und ob diese Technologien die marktseitigen Anforderungen der Anwendungsfälle erfüllen.

## 1.4 Zielstellung

Für eine zielgerichtete Entwicklung in komplexen Technologiefeldern, wie das der angepassten Servicekonzepte für Fahrzeuge mit automatisierten Fahrfunktionen, müssen die Wirkbeziehungen innerhalb eines Technologiefelds bekannt sein. Es gilt, die marktgetriebenen Anforderungen mit den technologischen Potenzialen abzugleichen und eine Priorisierung von Technologieprojekten im Sinne des strategischen Technologiemanagements vorzunehmen. Hierzu müssen geeignete Methoden bereitgestellt werden, die eine Strukturierung von Technologiefeldern in einer frühen Phase ermöglichen und dynamische Technologieentwicklungsprozesse berücksichtigen.

Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines geeigneten Methodenansatzes, um das Technologiemanagement in strategischen Entscheidungssituationen bei der Priorisierung von Technologieprojekten zu unterstützen. Der Fokus soll insbesondere auf der Anwendung in neuartigen Technologiefeldern, wie das der angepassten Servicekonzepte für Fahrzeuge mit automatisierten Fahrfunktionen, liegen. Hierbei gilt es, sowohl die Wirkbeziehungen zwischen den dominanten Elementen des Technologiefelds zu identifizieren bzw. zu dokumentieren als auch die hohe Entwicklungsdynamik auf der Technologieseite zu berücksichtigen. Als Ergebnis der Arbeit soll ein integrativer Ansatz bereitgestellt werden, der das Technologiemanagement in der Technologieauswahl, dem Technologietiming und der Definition der technologischen Leistungsfähigkeit unterstützt. Die Methodik soll jedoch kein eigenständiger Automatismus sein. Es soll ein Werkzeug bereitgestellt werden, das dem Anwender die Strukturierung von Wissen ermöglicht und die Erstellung von Entscheidungsvorlagen für die strategische Ausrichtung des Technologiefelds anstrebt.

Das Erarbeiten des Ansatzes ist wie folgt aufgeteilt:

- Ableitung relevanter Bewertungsparameter für die Priorisierung von Technologieprojekten,
- Identifikation der Wirkbeziehungen zwischen marktseitigen Anforderungen und technologieseitigen Potenzialen,
- Abbildung von dynamischen Technologieentwicklungsprozessen unter Berücksichtigung individueller Reifegrade,
- Bereitstellung von Entscheidungsgrundlagen und Dokumentation der Ergebnisse.

## 1.5 Lösungsansatz

Das Technologiemanagement wird in der Praxis durch eine breite Anzahl von Methoden unterstützt [150]. Die Eignung bestehender Ansätze zur Adressierung der vorhandenen Defizite

(vgl. Abschnitt 1.3) ist jedoch fraglich. Insbesondere die fortgeschrittene Komplexität neuartiger Technologiefelder, in der Wechselwirkungen frühzeitig betrachtet werden müssen, stellt klassische Methodenansätze vor neue Herausforderungen. Dies gilt insbesondere für interdisziplinäre Technologiefelder, wie die Robotik, die durch eine domänenübergreifende Struktur geprägt sind.

Ein Teilgebiet der Mathematik, das sich mit der Beschreibung und Analyse von komplexen Strukturen und den intern bestehenden Abhängigkeiten beschäftigt, ist die sogenannte Graphentheorie. In der Graphentheorie werden die Einflüsse und gegenseitigen Beziehungen in interdependenten Netzwerken untersucht und Ansätze zur Analyse der Abhängigkeitsverhältnisse bereitgestellt. Erste Untersuchungen zeigen, dass die Anwendung der Graphentheorie zur Unterstützung des Technologiemanagements in komplexen Entscheidungssituationen bei einer Strukturierung der Problemstellung unterstützen kann [108]. Die Kernhypothese, die in dieser Arbeit verfolgt wird, lautet entsprechend:

**Hypothese:** *Ansätze der Graphentheorie bieten Möglichkeiten zur Strukturierung und systematischen Bewertung komplexer Abhängigkeiten. Durch die Kombination von klassischen Methoden des Technologiemanagements mit Ansätzen der Graphentheorie können strategische Entscheidungen unterstützt werden. Ein integrativer Methodenansatz kann insbesondere in frühen Phasen, die durch hohe Unsicherheiten und Dynamik geprägt sind, bei der Ausrichtung von Technologiefeldern unterstützen und Handlungsempfehlungen für die zukünftige Entwicklung liefern.*

Um diese Hypothese zu überprüfen werden die Potenziale der Graphentheorie zur Anwendung im Technologiemanagement untersucht und der Ansatz einer Integration verfolgt. Das Vorgehen dieser Arbeit gliedert sich in eine *Analysephase* und eine *Synthesephase*. Aufbau und Inhalt dieser Phasen werden im Rahmen des nächsten Abschnitts näher beschrieben.

## 1.6 Aufbau der Arbeit

Zu Beginn der Arbeit wird in der Analysephase die Zielstellung dieser Arbeit weiter konkretisiert und mit bestehenden Lösungsansätzen gegenübergestellt, um den Handlungsbedarf zu präzisieren. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird in der Synthesephase ein eigener Methodenansatz entwickelt. Durch die exemplarische Anwendung des Ansatzes erfolgt abschließend die Validierung. In Tabelle 1.1 ist das Vorgehen der Arbeit mit den entsprechenden Kapiteln dargestellt.

Anhand der bereits beschriebenen *Einleitung* mit dem bestehenden Defizit und der entsprechenden Zielstellung wird in Kapitel 2 zunächst die Automatisierung fahrzeugorientierter Servicetätigkeiten detailliert betrachtet, um das Themenfeld zu konkretisieren. Das Themenfeld wird als *Automotive Service Robotics* von der klassischen Service Robotik abgegrenzt und die Handlungsbedarfe in das Technologiemanagement eingeordnet.

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden in Kapitel 3 die *Methodischen Grundlagen und der Untersuchungsgegenstand* dargestellt. Hierbei wird zunächst ein Einblick in die Unternehmensfunktion des Technologiemanagements gegeben und die bestehenden Lösungsansätze zur Adressierung der Problemstellung werden vorgestellt. Ferner werden sowohl klassische Methodenansätze als auch Forschungsansätze beschrieben und im Kontext des Handlungsbedarfs bewertet. Auf Grundlage

**Tabelle 1.1:** Aufbau der Arbeit

Analyse	1	<b>Einleitung</b> Motivation   Defizit   Zielsetzung
	2	<b>Automotive Service Robotics</b> Automatisiertes Fahren   Automatisierte Servicetätigkeiten
	3	<b>Methodische Grundlagen des Technologiemanagements und Handlungsbedarf</b> Stand der Technik   Stand der Forschung   Handlungsbedarf
Synthese	4	<b>Potenziale der Graphentheorie zur Anwendung im Technologiemanagement</b> Beschreibungs- und Analyseansätze
	5	<b>Entwicklung eines Methodenansatzes</b> Grundprinzip   Verfahrensschritte
	6	<b>Anwendung des Methodenansatzes auf Automotive Service Robotics</b> Umsetzung   Anwendung
	7	<b>Diskussion der Ergebnisse</b> Anwendbarkeit   Mehrwert   Limitationen
	8	<b>Schlussbetrachtung</b> Zusammenfassung   Ausblick

der Bewertung werden die zuvor identifizierten Handlungsbedarfe für die Methodenentwicklung konkretisiert.

In Kapitel 4 werden die inhaltlichen Grundlagen für die Methodenentwicklung bereitgestellt. Hierzu werden die *Potenziale der Graphentheorie* für die Entwicklung eines Methodenansatzes zur Unterstützung des strategischen Technologiemanagements vorgestellt. Im Zuge des Abschnitts werden die Beschreibungsansätze für graphentheoretische Problemstellungen dargestellt und Anwendungsmöglichkeiten für das Technologiemanagement aufgezeigt.

Aufbauend auf den Ergebnissen erfolgt in Kapitel 5 die *Entwicklung eines Methodenansatzes*. Auf Basis der beschriebenen graphentheoretischen Ansätze wird ein dreiphasiger Ansatz zur Unterstützung des Technologiemanagements in komplexen Technologiefeldern vorgestellt. Es wird zunächst das generelle Vorgehen präsentiert und im weiteren Verlauf des Kapitels auf die einzelnen Methodenschritte näher eingegangen.

Mit der *Anwendung des Methodenansatzes* in Kapitel 6 wird im Anschluss die Anwendbarkeit und der Mehrwert des entwickelten Methodenansatzes untersucht. Hierzu erfolgt eine Umsetzung des Ansatzes in Form einer Toolkette und die anschließende Anwendung auf das Technologiefeld

der angepassten Servicekonzepte für Fahrzeuge mit automatisierten Fahrfunktionen. Anhand der Ergebnisse werden die Anwendbarkeit und der Mehrwert des Methodenansatzes in Kapitel 7 diskutiert, bewertet und in das Technologiemanagement eingeordnet.

Den Abschluss der Arbeit bildet in Kapitel 8 die *Schlussbetrachtung* mit einem Rückblick auf die vorangegangenen Ausführungen in Bezug zu Defizit und Zielsetzung. Zudem werden die Inhalte dieser Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten gegeben.





## 2 Automotive Service Robotics

Für die Erarbeitung eines geeigneten Methodenansatzes zur Unterstützung der strategischen Technologieplanung wird in diesem Kapitel zunächst das Technologiefeld der Automotive Service Robotics (ASR) beschrieben. Hierzu wird, aufbauend auf einer Einführung in die Thematik des automatisierten Fahrens, die Motivation für eine Automatisierung von Servicetätigkeiten im Kontext von automatisierten Fahrfunktionen in Abschnitt 2.2 beschrieben. Im weiteren Verlauf des Kapitels wird das Technologiefeld ASR von anderen Bereichen der Robotik abgegrenzt. Ferner werden relevante Begrifflichkeiten definiert (vgl. Abschnitt 2.3). Den Abschluss des Kapitels bilden ein Überblick über Beispielapplikationen zur Verdeutlichung der technischen Herausforderungen sowie eine Beschreibung des Spannungsfelds, das sich aus den Fragestellungen der strategischen Ausrichtung von ASR ergibt.

### 2.1 Einführung in das automatisierte Fahren

Durch die stetige Weiterentwicklung von Fahrerassistenzsystemen (FAS) wird der Fahrer immer weiter von der Fahraufgabe entlastet und intelligente Systeme übernehmen mehr und mehr die Fahrzeugführung. Im Rahmen dieses Abschnitts zunächst die aktuellen Entwicklungen im Bereich automatisierter Fahrfunktionen (AFF) kurz erläutert. Aufbauend hierauf werden die Auswirkungen dieser Entwicklungen auf unterschiedliche Mobilitätsformen erläutert, um die zukünftig entstehenden Potenziale und Herausforderungen zu verdeutlichen.

Die fortschreitende Entwicklung von automatisierten Fahrfunktionen stellt einen der größten Trends in der Automobilindustrie dar. Eine Vielzahl von Unternehmen strebt nach einer Automatisierung der Fahrzeugsteuerung mit dem Ziel, den Menschen vollständig von der Fahraufgabe zu entbinden. Diese Zielbild, das sogenannte *fahrerlose Fahren*, stellt die letzte Ausbaustufe von fünf Ebenen dar, in denen Fahrzeuge mit automatisierten Fahrfunktionen differenziert werden [114, 141, 183]. In der Automatisierungsstufe 5 (vgl. Tabelle A.1) werden die Fahraufgaben vollumfänglich in allen Anwendungsfällen vom Fahrzeug übernommen und ein Mensch ist als Rückfallebene nicht mehr erforderlich. Dies umfasst sämtliche Geschwindigkeits-, Witterungs- und Straßenverhältnisse [7]. Hieraus abgeleitet ergeben sich verschiedene Zwischenebenen des automatisierten Fahrens. Diese sind in Anhang A.1 detailliert erläutert. Diese steigende Automatisierung der Fahrfunktionen ermöglicht neue Formen der Fahrzeugnutzung und innovative Geschäftsmodelle rund um die Fahrzeugnutzung [92, 180]. Diese neuen Nutzungsformen stellen die Ausgangsbasis für das Technologiefeld ASR dar. In diesem Abschnitt werden daher die Auswirkungen der Nutzungsformen beschrieben, der Bedarf für Automotive Service Roboter abgeleitet und die Anforderungen an das Themenfeld dargestellt.

Durch die stetige Weiterentwicklung in den FAS ist es bereits mit heutiger Fahrzeugsensorik möglich, die ersten automatisierten Fahrfunktionen wie das *automatisierte Valetparking* abzubilden. So zeigt das Projekt V-CHARGE die Potenziale für den Einsatz in einem automatisierten Parkhausszenario [51]. Hierbei wird, durch die Kombination von Fahrzeugsensorik mit erweiterter Infrastrukturintelligenz, eine vollautomatisierte Parkplatzsuche innerhalb eines Parkhauses

realisiert. Dies ermöglicht dem Fahrer ein komfortables Parken sowie eine effizientere Parkraumnutzung auf Betreiberseite [26, 174]. Neben der Anwendung in öffentlichen Parkhäusern können solche Funktionalitäten den Kundenkomfort auch im privaten Umfeld erhöhen. So bieten verschiedene Hersteller automatisierte Parkassistenten an, die eine Unterstützung beim Parken in der privaten Garage bieten, indem das Fahrzeug die letzten Meter selbstständig in die Garage fährt [104, 127]. Hierüber können bereits mit heutigen Fahrzeuggenerationen Funktionalitäten der Stufe 3 abgebildet und eine Teilautomatisierung erreicht werden [30]. Perspektivisch soll ein vollständig automatisiertes Fahren ermöglicht werden [7].

Durch die steigende Automatisierung verändern sich neben der Individualmobilität auch Nutzungsarten anderer Mobilitätsformen. Als ein Beispiel können Mobility on Demand (MoD)-Konzepte angeführt werden. Hierunter wird die bedarfsorientierte Bereitstellung von Mobilität als Produkt verstanden, wie es z. B. bei der Nutzung von Bus oder Bahn erfolgt [196]. Erste Unternehmen wie NAVYA oder EASYMILE zeigen einen Ausblick, wie eine zukünftige Automatisierung des öffentlichen Personenverkehrs (ÖPV) aussehen kann [168]. Hierbei wird von Automated Mobility on Demand (AMoD) Systemen gesprochen. Eine weitere Form von AMoD-Konzepten resultiert aus der Automatisierung des Ridesharing [120, 166]. In dieser Form der Mobilität können Sitzplätze in automatisierten Sammeltaxis auf Kundenanfrage gebucht werden und es erfolgt eine Routenanpassung in Anlehnung an die Kundenwünsche. Durch diese Zusammenlegung von Einzelfahrten soll perspektivisch das Fahrzeugaufkommen in Innenstädten reduziert werden [92, 176]. Erste Unternehmen wie MOIA erproben solche Fahrservices, zurzeit mit einem menschlichen Fahrer [109].

Auch die Kombination von AFF mit anderen Dienstleistungen wie Carsharing eröffnen neue Nutzungsmöglichkeiten für Fahrzeuge. Heutige Carsharingangebote basieren auf einer stationsbasierten Abholung und Abgabe oder auf dem Free-Floating-Prinzip, in dem die Fahrzeuge in einem definierten Bereich im öffentlichen Raum abgestellt werden können [92]. Die Kombination mit automatisierten Fahrfunktionen kann zu einer Flexibilisierung und Effizienzsteigerung beitragen, indem beispielsweise automatisierte Valetparking-Funktionen das Abstellen oder Abholen des Fahrzeugs übernehmen oder eine bedarfsorientierte Umverteilung innerhalb der Fahrzeugflotte stattfindet [103]. Hierbei wird auch von Mobility as a Service (MaaS) gesprochen. Eine weitere Instanz solcher Angebote stellen die sogenannten Robotaxis dar, die einen vollautomatisierten Taxibetrieb ohne menschlichen Fahrer realisieren [7]. MaaS-Konzepte bilden eine Untermenge von AMoD. Die Unterscheidung liegt in der individuellen Planbarkeit durch den Nutzer von MaaS und der persönlichen Zuordnung des Fahrzeugs zu einem Kunden [196]. Über die genannten Anwendungsmöglichkeiten von automatisierten Fahrfunktionen hinaus eröffnet sich eine Vielzahl von weiteren Potenzialen z. B. im Güterverkehr, die an dieser Stelle jedoch nicht weiter betrachtet werden. Im nächsten Abschnitt werden, aufbauend auf den neuen Anwendungsmöglichkeiten von Fahrzeugen mit automatisierten Fahrfunktionen, die resultierenden Herausforderungen abgeleitet und die Motivation für das Technologiefeld ASR beschrieben.

## 2.2 Motivation für Automotive Service Robotics

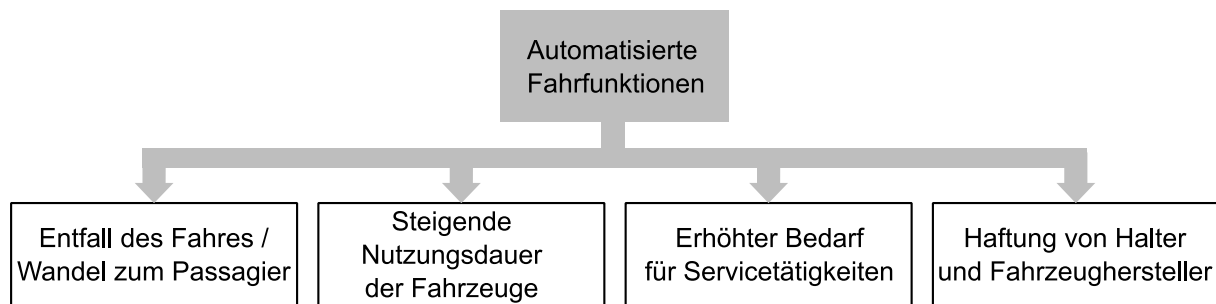
Die in Abschnitt 2.1 dargestellte Veränderung in der Fahrzeugnutzung durch AFF bilden die Motivation für das Technologiefeld ASR. Bedingt durch den (zeitweisen) Entfall des Fahrers bzw. den Wandel des Fahrers zum Passagier ergeben sich neue Bedarfe rund um die Fahrzeugnutzung.

Diese Bedarfe werden zunächst hergeleitet und die entstehenden Potenziale für eine Automatisierung beschrieben. Den Ausgangspunkt bilden die Auswirkungen neuer Nutzungsformen durch AFF.

### 2.2.1 Auswirkung automatisierter Fahrfunktionen

In Abbildung 2.1 ist ein Überblick über die zu erwartenden Auswirkungen durch die fortschreitende Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen dargestellt. Eine der offensichtlichsten Auswirkungen ist der *Entfall des Fahrers*. Dies wird in den meisten Anwendungsfällen als größtes Potenzial, insbesondere im Hinblick auf finanzielle Einsparungen in der kommerziellen Nutzung von AMoD-Systemen, gesehen [92, 103, 188]. Jedoch übernimmt der Fahrer neben der Fahraufgabe heutzutage auch weitere Tätigkeiten im Fahrzeugkontext. Hierzu gehören beispielsweise das Auffüllen bestimmter Betriebsmittel, das Betanken oder Reinigen des Fahrzeugs. Dies gilt sowohl für die Individualmobilität als auch für AMoD-Angebote, wie beispielsweise den automatisierten Taxibetrieb. Bedingt durch die steigende Automatisierung ergibt sich zudem eine *steigende tägliche Nutzungsdauer* der Fahrzeuge in AMoD-Systemen und im Warentransport bis hin zu einem 24-Stunden-Betrieb. Hieraus folgt auch ein deutlicher Anstieg der Fahrzeuglaufleistung, was in einer Reduzierung der Fahrzeuglebensdauer resultiert [21, 96, 97, 120].

Aus der steigenden Nutzungsdauer resultiert auch der *steigende Bedarf für Servicetätigkeiten*. Als Servicetätigkeiten werden sowohl Tätigkeiten verstanden, die die Betriebsbereitschaft des Fahrzeugs aufrecht erhalten, wie der Betriebsmittel- oder Reifenwechsel, als auch zusätzliche, komfortorientierte Services, wie die Reinigung des Fahrzeugs. Um die Verfügbarkeit der Fahrzeuge zu maximieren und den Betrieb von AMoD-Systemen zu optimieren, kommt diesen Tätigkeiten eine besondere Bedeutung zu [96, 97].



**Abbildung 2.1:** Auswirkungen automatisierter Fahrfunktionen auf die Fahrzeugnutzung

Die *Haftung von Betreiber und Fahrzeughersteller* stellt eine weitere Auswirkung von automatisierten Fahrfunktionen dar. Nach aktueller Gesetzeslage gehen die Fahrzeughersteller durch die Bereitstellung von entsprechenden FAS die Verpflichtung ein, dass Unfälle aufgrund von Produktfehlern ausgeschlossen sind. Somit findet eine Haftungsverlagerung auf den Fahrzeughersteller statt. Bei eventuellen Unfällen automatisierter Fahrzeuge werden die Fahrzeughersteller deutlich stärker in die Haftungsfrage involviert. Darüber hinaus sind für die Betreiber von MoD- und MaaS-Systemen, die als Halter der Fahrzeuge fungieren, ebenfalls neue Herausforderungen zu erwarten, da ein fehlerfreier Betrieb der Fahrzeuge sichergestellt werden muss. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die aktuelle Gesetzeslage noch nicht in der Lage ist, diese Art der Haftungsfragen eindeutig zu klären. [52, 64, 101]

### 2.2.2 Potenziale einer Automatisierung

Um das vollständige Potenzial von Fahrzeugen mit AFF auszuschöpfen, müssen den Nutzern und Betreibern angepasste Servicekonzepte zur Verfügung gestellt werden [97]. Dies bezieht sich sowohl auf die automatisierte Individualmobilität als auch auf AMoD-Systeme, jedoch unterscheidet sich die Ausrichtung dieser Servicekonzepte. Während in der automatisierten Individualmobilität ein neuer Bedarf zur Steigerung des Kundenkomforts entstehen wird, werden in automatisierten Mobilitätssystemen vornehmlich neue Konzepte zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit benötigt werden [47]. Eine detaillierte Erläuterung dieser Bedarfe ist in Anhang A.2 zu finden.



(a) Ladestation mit Elektrofahrzeug



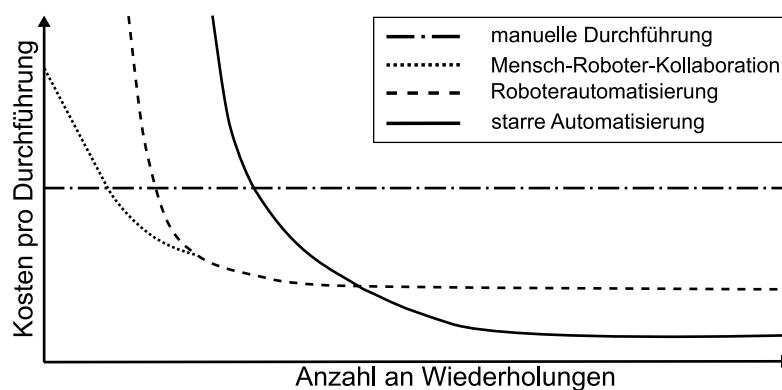
(b) Automatisierter Steckvorgang mit standardisierter Ladeschnittstelle

**Abbildung 2.2:** Ladekonzept E-SMARTCONNECT der VOLKSWAGEN KONZERNFORSCHUNG und KUKA

Der durch die Automatisierung von Fahrfunktionen entstehende Bedarf für neue und angepasste Servicekonzepte bietet das Potenzial, durch den Einsatz von Automatisierungstechnik und Robotik gedeckt zu werden [47]. Dies soll am Beispiel des Kooperationsprojekts E-SMARTCONNECT zwischen der VOLKSWAGEN KONZERNFORSCHUNG und dem Roboterhersteller KUKA [189] verdeutlicht werden, welches in Abbildung 2.2 dargestellt ist. Im Rahmen des Projekts wurde eine Lösungsmöglichkeit für die Automatisierung des Ladevorgangs als Alternative zum induktiven Laden im Zusammenspiel mit dem automatisierten Valetparking realisiert. Ziel des Projekts war es, den konduktiven Steckvorgang beim automatisierten Parken durch einen Industrieroboter zu automatisieren, um eine vollständig automatisierte Park- und Ladelösung abzubilden und einen erhöhten Kundenkomfort zu erzielen [189].

Das Fahrzeug positioniert sich hierzu mithilfe seiner Sensorik vor der Ladestation. Über eine Kamera am Roboter wird die Ladeschnittstelle des Fahrzeugs identifiziert und der Steckvorgang vollautomatisch gestartet. Nach Abschluss des Ladevorgangs entfernt der Roboter das Ladekabel und die Ladestation wird für das nächste Fahrzeug freigegeben. Durch die eingesetzte Automatisierungstechnik und Ladetechnologie ist es möglich, auf die standardisierte Ladeschnittstelle des Fahrzeugs zurückzugreifen und hohe Ladeleistungen zu erzielen. Ein Roboter vom Typ KUKA LBR iiwa [86], der für die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) geeignet ist, ermöglicht zudem den sicheren Betrieb des Systems im öffentlichen Raum ohne trennende Schutzeinrichtungen. An diesem Beispiel wird deutlich, wie der Einsatz von Automatisierungstechnik den Kundenkomfort in der automatisierten Individualmobilität erhöhen kann.

Im Gegensatz zur Individualmobilität bestehen bei automatisierten Mobilitätssystemen andere Automatisierungspotenziale. Durch die zu erwartende große Anzahl an Fahrzeugen in vollautomatisierten Mobilitätssystemen steigt auch die Anzahl der benötigten Servicetätigkeiten [47, 97]. Der Einsatz von Automatisierungstechnik kann folglich zu Kosteneinsparungen führen, analog zu den Kosteneinsparungen in der Automatisierung von stark repetitiven Fertigungsprozessen [2]. In Abbildung 2.3 sind die Kosten für die Durchführung einer Service- oder Handhabungstätigkeit qualitativ über die Anzahl der Wiederholungen bei verschiedenen Arten der Automatisierung aufgetragen. Die Darstellung ist angelehnt an die Abhängigkeit der Produktionsstückkosten vom Produktionsvolumen bei unterschiedlichen Automatisierungsansätzen in der industriellen Anwendung. Während bei einer manuellen Durchführung der Servicetätigkeiten die Kosten für jede Wiederholung konstant bleiben, sinken die Kosten durch den Einsatz von Automatisierungstechnik bei steigender Anzahl an Wiederholungen. Bei einer Automatisierung durch die MRK, in der eine direkte Interaktion von Mensch und Roboter ohne zusätzliche Schutzeinrichtung stattfindet, entsteht insbesondere bei einer geringen Anzahl an Wiederholungen ein Einsparungspotenzial. Dies begründet sich durch die hohe Flexibilität von MRK-Robotern sowie den Verzicht auf Sicherheitseinrichtungen durch die Eigensicherheit der Roboter. Bei mittleren bis hohen Stückzahlen bietet eine Automatisierung durch Industrieroboter aufgrund ihrer Flexibilität das größte Einsparungspotenzial. Für sehr hohe Stückzahlen sind starre Automatisierungssysteme vorteilhaft, da eine aufgabenspezifische Optimierung der Systeme erfolgen kann. Abhängig von der Anzahl an Wiederholungen sind folglich unterschiedliche Automatisierungsansätze zu favorisieren, um die Kostenziele zu erfüllen. [3, 102, 115, 172]



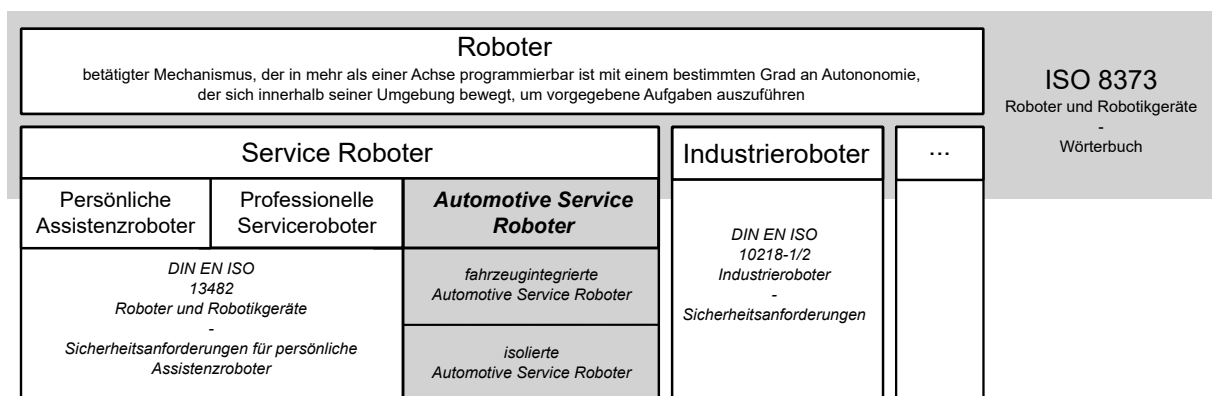
**Abbildung 2.3:** Wirtschaftliche Potenziale unterschiedlicher Automatisierungsansätze in Produktionsanwendungen, in Anlehnung an [102]

Weiterhin lässt sich durch den Einsatz von Automatisierungstechnik eine konstante Qualität und Reproduzierbarkeit der Servicetätigkeiten erreichen. Dies ist insbesondere in Bezug auf die Sicherstellung der Betriebsbereitschaft von Bedeutung. Durch die Einbindung von Fahrzeughersteller und Betreiber in die Haftung (vgl. Abschnitt 2.2.1) kann eine Automatisierung von Servicetätigkeiten, wie die Sensorreinigung oder der regelmäßige Wechsel von Betriebsstoffen, zur Gewährleistung der dauerhaften Fahrbereitschaft und zum sicheren und wirtschaftlichen Betrieb von automatisierten Mobilitätssystemen beitragen. [47]

## 2.3 Abgrenzung von Automotive Service Robotics

Der Themenkomplex, Servicetätigkeiten im Kontext automatisiert fahrender Fahrzeuge zukünftig durch den Einsatz von Robotik zu realisieren, wird in der VOLKSWAGEN KONZERNFORSCHUNG im Technologiefeld Automotive Service Robotics untersucht [47]. Diese Form neuartiger Roboterapplikationen motiviert sich aus der stetigen Entwicklung der Service Robotik und dem steigenden Bedarf für angepasste Servicekonzepte im Kontext von AFF (vgl. Abschnitt 2.2.1). Im Fokus der Betrachtung liegen Automatisierungslösungen, die in der Individualmobilität den Privatkunden von Servicetätigkeiten entlasten und so eine Komfortsteigerung erzielen. Zum anderen werden Automatisierungslösungen untersucht, die in AMoD-Systemen den Entfall des Fahrers kompensieren, um die Verfügbarkeit der Fahrzeuge zu maximieren und vollumfängliche Servicekonzepte zu ermöglichen. Das Themenfeld kann als eine Untermenge der Service Robotik in Anlehnung an die ISO 8373 [69] verstanden werden. In den folgenden Kapiteln soll für ein besseres Verständnis des Technologiefelds zunächst in Abschnitt 2.3.1 eine Definition der relevanten Begriffe und eine Abgrenzung zu anderen Bereichen der Robotik vorgenommen werden. Weiterhin werden in Abschnitt 2.3.2 Beispiellapplikationen dargestellt.

### 2.3.1 Definition und Einordnung in die Robotik



**Abbildung 2.4:** Abgrenzung des Technologiefelds Automotive Service Robotics [33, 34, 36, 69]

Der Begriff Robotik ist durch die ISO 8373 [69] definiert. Hiernach ist ein Roboter ein „aktuierter Mechanismus, der in mehr als einer Achse programmierbar ist und sich autonom innerhalb seiner Umgebung bewegt“. Weiterhin ist zwischen sogenannten Industrierobotern und Servicerobotern zu unterscheiden. Während Industrieroboter die Automatisierung in der industriellen Umgebung adressieren, sind Serviceroboter darauf ausgerichtet, „nützliche Aufgaben für Menschen, die Gesellschaften oder Einrichtungen“ zu verrichten [69]. Eine weitere Unterkategorie der Roboter stellen die mobilen Roboter dar, die in der Lage sind, sich selbstständig im Raum zu bewegen und nicht stationär verortet sind. Dabei ist das Vorhandensein eines Manipulators nicht zwingend erforderlich, es kann sich auch um eine mobile Plattform, beispielsweise für Transportaufgaben, handeln. Sowohl Industrie- als auch Serviceroboter können als mobile Roboter ausgeführt werden.

Innerhalb der Serviceroboter kann zwischen persönlichen und professionellen Servicerobotern differenziert werden. Persönliche Serviceroboter verrichten nicht-gewerbliche Aufgaben für

Privatpersonen, wohingegen professionelle Serviceroboter für einen gewerblichen Zweck von einem eingewiesenen Bediener eingesetzt werden. Beispiele für persönliche Assistenzroboter sind Roboter, die Menschen in ihrer Bewegung unterstützen oder eine vollständige Personenbeförderung realisieren. Typische Vertreter der professionellen Serviceroboter sind Wartungsroboter oder Tauchroboter. [69]

In Anlehnung an diese Kategorisierung sind die Automotive Service Roboter als Untermenge der Serviceroboter zu verstehen [47]. Da diese Arten von Robotern sowohl im privaten als auch gewerblichen Bereich zum Einsatz kommen, sind sie eine Sonderform. Übergeordnetes Ziel der Automotive Service Roboter ist die Automatisierung von fahrzeugorientierten Servicetätigkeiten. In Abbildung 2.4 ist die Einordnung der Automotive Service Roboter in den Gesamtkontext der Robotik nach ISO 8373, sowie die zugehörigen C-Normen nach ISO 12100 [35], dargestellt.

Die Automotive Service Roboter grenzen sich zu den persönlichen und professionellen Servicerobotern dadurch ab, dass die adressierten Serviceaktivitäten einen direkten Fahrzeugbezug haben. Je nach Ausführungsform kann zwischen fahrzeugintegrierten und isolierten Automotive Service Robotern unterschieden werden. Um im weiteren Verlauf der Arbeit ein besseres Verständnis zu ermöglichen, gilt es die relevanten Begrifflichkeiten zu definieren und voneinander abzugrenzen. Die Ausführungen ergänzen die bestehende Ontologie [47]. Die Definition des Begriffs Automotive Service Roboter lehnt sich an die im Vorfeld beschriebene Definition des Begriffs Serviceroboter an.

**Definition 2.1** *Unter dem Begriff Automotive Service Roboter wird ein Serviceroboter verstanden, der eine oder mehrere nützliche Aufgaben durchführt, die einen direkten Bezug zu einem Kraftfahrzeug haben, und hierbei physisch mit dem Fahrzeug interagiert.*

Ob dieses Kraftfahrzeug über, wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, automatisierte Fahrfunktionen verfügt, ist bewusst offen gelassen, um Applikationen zu integrieren, die auf manuellen Fahrfunktionen basieren. Die physische Interaktion mit dem Fahrzeug zielt weiterhin auf eine Abgrenzung zum Bereich der digitalen Fahrzeugservices [12, 205] ab und beschränkt die Automotive Service Roboter auf technische Applikationen.

Innerhalb der Automotive Service Roboter kann zwischen Systemen unterschieden werden, die direkt in das Fahrzeug integriert und fahrzeuggebunden sind, und isolierten Systemen, die lediglich mit dem Fahrzeug interagieren, also in den meisten Anwendungsfällen infrastrukturgebunden sind. Bei integrierten Automotive Service Robotern resultiert eine direkte Zuordnung von Fahrzeug zu Roboter und eine systemische Abgrenzung. Hingegen ist diese direkte Zuordnung von Fahrzeug zu Roboter bei isolierten Systemen nicht vorhanden und ein infrastrukturgebundener Roboter kann mehrere Fahrzeuge bedienen. Hieraus ergeben sich die folgenden Definitionen.

**Definition 2.2** *Unter einem fahrzeugintegrierten Automotive Service Roboter wird ein Automotive Service Roboter (vgl. Definition 2.1) verstanden, der direkt in das Fahrzeug integriert ist und ausschließlich Servicetätigkeiten für dieses Fahrzeug durchführt. Hierbei muss der Roboter nicht stationär im Fahrzeug verortet sein.*

Die instationäre Verortung adressiert den Einsatz mobiler Roboter innerhalb des Fahrzeugs, um den Arbeitsraum zu vergrößern. Erste Patentanmeldungen in diesem Feld zielen beispielsweise



auf den Einsatz mobiler Reinigungsroboter im Fahrzeuginnenraum ab [24]. Entsprechend der obigen Ausführung ergibt sich die Definition eines isolierten Automotive Service Roboters wie folgt:

**Definition 2.3** *Unter einem isolierten Automotive Service Roboter wird ein Automotive Service Roboter (vgl. Definition 2.1) verstanden, der segregiert von einem Fahrzeug betrieben wird, situativ in Interaktion mit Fahrzeugen treten kann und so Servicetätigkeiten für verschiedene Fahrzeuge durchführt.*

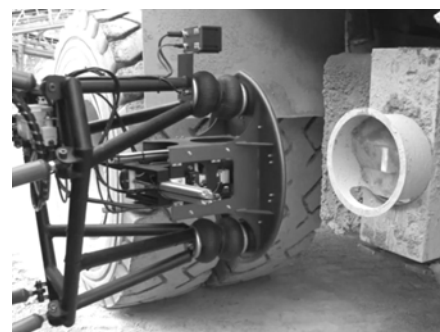
Eine Veranschaulichung dieser Zusammenhänge wird im weiteren Verlauf durch die Beschreibung von Beispielapplikationen von ASR im Rahmen von Abschnitt 2.3.2 vorgenommen. Neben den Ausführungsformen kann auch in den Einsatzzwecken unterschieden werden. Hier grenzen sich die ersetzenden und unterstützenden Systeme voneinander ab [47]. Ein ersetzender Automotive Service Roboter ist für die Kompensation des Fahrerentfalls durch automatisierte Fahrfunktionen ausgerichtet. Ein unterstützendes System bietet eine ergonomische oder prozesstechnische Optimierung einer Servicetätigkeit durch Unterstützung des Menschen.

### 2.3.2 Beispielapplikationen

Zur Abgrenzung des Technologiefelds ASR werden im Rahmen dieses Abschnitts Beispielapplikationen erläutert und in die beschriebenen Kategorien eingeordnet. Die vorgestellten Applikationen adressieren in ihrer Ausführung unterschiedliche Problemstellungen, die sowohl in Folge automatisierter als auch teilautomatisierter Fahrfunktionen entstehen. In Abbildung 2.5 sind zwei Beispielapplikationen für isolierte Automotive Service Roboter dargestellt. Der Laderoboter der TU-GRAZ adressiert das automatisierte Laden von Elektrofahrzeugen, motiviert durch die zunehmende Automatisierung des Parkvorgangs. Die zweite Applikation der Firma ROTEC ENGINEERING B.V. [136] zeigt eine Realisierungsform für die automatisierte Betankung von Fahrzeugen im Minenbetrieb.



(a) Laderoboter der TU-GRAZ [178]



(b) ROTEC ENGINEERING B.V. Tankroboter [136]

**Abbildung 2.5:** Beispielanwendungen für isolierte Automotive Service Roboter

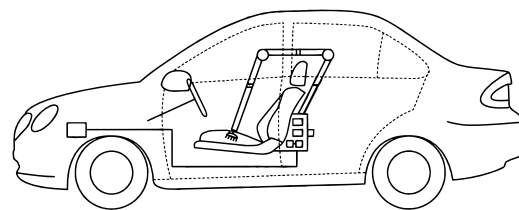
Das in Abbildung 2.5a gezeigte Ladesystem wurde von der TU-GRAZ entwickelt und ermöglicht den automatisierten Betrieb einer Ladeinfrastruktur. Ziel ist es, die Auslastung der Ladestation sowie den Kundenkomfort während des Ladevorgangs zu optimieren. Auch eine Kombination des entwickelten Ladesystems mit automatisierten Parkfunktionen ist angedacht [178]. Diese

Applikation verfolgt eine ähnliche Zielstellung wie das Forschungsprojekt E-SMARTCONNECT der VOLKSWAGEN KONZERNFORSCHUNG [47, 189], welches in Abschnitt 2.2.2 dargestellt ist. Das Ladesystem der TU-GRAZ basiert auf einer seriellen Kinematik der Firma UNIVERSAL ROBOT [181], die für MRK-Anwendungen ausgelegt ist. Somit wird der sichere Betrieb ohne zusätzliche Schutzeinrichtungen im öffentlichen Raum ermöglicht. Über ein Kamerasystem werden Position und Orientierung des Fahrzeugs erkannt und die Pose, die räumliche Lage der Ladedose, bestimmt. Eine fahrzeugseitige Anpassung der Ladeschnittstelle ist nicht nötig und es können unterschiedliche Typen von Elektrofahrzeugen bedient werden. Da es sich bei dieser Applikation um eine infrastrukturegebundene Lösung handelt, die den Ladevorgang unterschiedlicher Elektrofahrzeuge realisiert, fällt diese Anwendung in die Gruppe der isolierten Automotive Service Roboter (vgl. Abschnitt 2.3.1). [107, 178, 199, 200]

Die in Abbildung 2.5b dargestellte Roboterapplikation verfolgt eine ähnliche Zielstellung. In der von der Firma ROTEC ENGINEERING B.V. entwickelten Lösung wird der Tankvorgang von Minenfahrzeugen durch den Einsatz eines Roboters automatisiert. Der Einsatz einer Automatisierungslösung im Minenbetrieb motiviert sich durch das Potenzial von automatisierten Fahrfunktionen für den Minenbetrieb. In der Erprobung automatisierter Fahrfunktionen nehmen Minenbetriebe eine Vorreiterrolle ein, da der Einsatzbereich definierte Randbedingungen aufweist und die Unfallgefahr minimiert werden kann. Daher wird die Umsetzung von automatisierten Fahrfunktionen dort als kurzfristig realisierbares Szenario eingestuft [46, 208] und die Automatisierung des Tankvorgangs als notwendige Voraussetzung für einen autarken Betrieb gesehen. Die Applikation ist im Gegensatz zum Ansatz der TU-GRAZ auf die Betankung mit klassischen Betriebsstoffen ausgelegt. Hierzu kommt eine parallelkinematische Struktur zum Einsatz. Die Fahrzeugerkennung erfolgt ebenfalls über ein optisches Messsystem. Aufgrund der infrastrukturegebundenen Ausführung ist diese Applikation ebenfalls den isolierten Automotive Service Robotern zuzuordnen. [4, 136, 137, 158]



(a) Automatisierter Behältertransport im Projekt ROAR der UNIVERSITÄT CHALMERS in Kooperation mit VOLVO [20]



(b) System zur automatisierten Innenraumreinigung, angemeldet von der DAIMLER AG [25]

**Abbildung 2.6:** Beispielanwendungen für integrierte Automotive Service Roboter

Durch die Entwicklung von AFF ergeben sich auch im Bereich der Nutzfahrzeuge neue Potenziale für eine Automatisierung. Durch den Entfall des Fahrers bei automatisiert fahrenden Abfallsammelfahrzeugen kann beispielsweise der Transport häuslicher Sammelbehälter zum Fahrzeug neu betrachtet werden. Während heute überwiegend Fahrer oder Beifahrer den Transport von Sammelbehältern vom Grundstück bis zum Fahrzeug übernehmen, kann dies zukünftig durch den Einsatz von Automatisierungssystemen erfolgen. Das Projekt ROAR [20, 194] der UNIVERSITÄT

CHALMERS in Kooperation mit VOLVO zeigt die Umsetzung einer solchen Automatisierungslösung. Durch den Einsatz einer mobilen Plattform zum Transport von Sammelbehältern im urbanen Umfeld kann ein vollständig automatisierter Abtransport erreicht werden. Hierbei wird die mobile Plattform über eine entsprechende Schnittstelle mechanisch an ein automatisiert fahrendes Abfallsammelfahrzeug gekoppelt und so in den Einsatzbereich transportiert. Innerhalb des Einsatzbereichs übernimmt die mobile Plattform den Transport der Abfallsammelbehälter zum Fahrzeug. In Abbildung 2.6a ist die beschriebene mobile Plattform in der Interaktion mit dem Fahrzeug dargestellt. Da die mobile Plattform über eine mechanische Schnittstelle an das Fahrzeug gekoppelt wird und eine direkte Zuordnung von Fahrzeug zu Roboter besteht, fällt diese Applikation in die Kategorie der integrierten Automotive Service Roboter (vgl. Abschnitt 2.3.1).

Neben der Automatisierung fahrzeugorientierter Servicetätigkeiten bestehen auch Ansätze, die auf die Steigerung des Kundenkomforts ausgerichtet sind (vgl. Anhang A.2). Insbesondere für den Betrieb von MaaS-Systemen mit einer großen Anzahl von Fahrzeugen nimmt die Innenraumreinigung eine übergeordnete Rolle ein, da die Sauberkeit von automatisierten Fahrzeugen zur Akzeptanz beiträgt [97]. Die in Abbildung 2.6b dargestellte Patentanmeldung der DAIMLER AG zeigt einen exemplarischen Lösungsansatz, in dem die Innenraumreinigung durch eine Roboterkinematik übernommen wird. Hierbei ist die Kinematik fest verbaut und über eine Schnittstelle an die Fahrzeugkommunikation angebunden. Zudem kann über unterschiedliche Aufsätze die Oberflächentopografie des Innenraums abgebildet werden. Durch die direkte Integration des Reinigungsroboters in das Fahrzeug fällt dieser ebenfalls in die Klasse der integrierten Automotive Service Roboter. [25]

## 2.4 Spannungsfeld Automotive Service Robotics

In diesem Abschnitt wird das Spannungsfeld von ASR beschrieben, um ein besseres Verständnis für die aktuellen Herausforderungen innerhalb des Themenfelds zu schaffen. Wie in Kapitel 1 aufgezeigt, zielt diese Arbeit auf eine Methodenentwicklung zur Unterstützung des Technologiemanagements für Themenfelder, die sich in einer frühen Phase befinden, wie es bei ASR der Fall ist, ab. Dieser Abschnitt legt folglich die grundlegende Problemstellung dar und bildet die Ausgangslage für die spätere Konkretisierung der Zielstellung.

Resultierend aus der Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten für ASR ergibt sich eine *hohe Komplexität des Themenfelds*. Erste Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Vielzahl von Anwendungspotenzialen für ASR bestehen und ein breites Spektrum an Applikationen denkbar ist [47]. Eine Priorisierung der Applikationen setzt eine methodische Untersuchung der Anwendungspotenziale voraus. In der Priorisierung sind sowohl die Machbarkeit aus technologischer Sicht als auch der marktseitige Bedarf für ASR zu berücksichtigen, um eine zielgerichtete Bearbeitung des Themenfelds zu ermöglichen. Eine intuitive Priorisierung der Applikationen ist hierbei nicht realisierbar, da hierzu eine Transparenz zwischen den Unternehmensbereichen (z.B. Forschung, Entwicklung, Vertrieb und Produktion) geschaffen werden muss [151]. Ein geeigneter Methodenansatz muss ein funktionsübergreifendes Vorgehen realisieren, in dem Transparenz durch Synchronisierung von Technologiepotenzialen und Marktbedarfen geschaffen wird.

Aufgabe des Technologiemanagements ist es, in Abhängigkeiten der Marktbedarfe für ASR die relevanten Technologien zu identifizieren und die entsprechenden Anforderungen für die Entwicklung abzuleiten. So können eine zielgerichtete Bearbeitung des Themenfelds ermöglicht und die Schwerpunkte für Forschungs- und Entwicklungsarbeiten gesetzt werden. Erschwert wird dies durch hohe Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den Technologien [47]. Somit gilt es, die Anwendungspotenziale in Form denkbarer Applikation für ASR in Anlehnung an die Markt- und Wettbewerbsstrategie zu priorisieren und die richtigen Technologien hierfür zu entwickeln. Dieser Aufgabe kommt eine besondere Bedeutung zu, da Fehlentscheidungen bei der Technologieauswahl große negative Auswirkungen auf den langfristigen Unternehmenserfolg haben [151].

Neben der Komplexität trägt auch die *frühe Phase des Themenfelds* zum Spannungsfeld ASR bei. Automatische Fahrfunktionen sind noch nicht oder nur teilweise verfügbar [96] und auch die ersten Applikationen von ASR weisen einen geringen Reifegrad auf (vgl. Abschnitt 2.3.2). Somit sind sowohl die zukünftigen Anforderungen als auch die Entwicklungen auf technologischer Seite durch ein hohes Maß an Unsicherheit geprägt. Dies wird verstärkt durch den langen Zeithorizont, der für eine marktreife Umsetzung von automatisierten Fahrfunktionen veranschlagt wird [7, 96, 97]. Dem Ziel, die richtigen Technologien zum richtigen Zeitpunkt zur Verfügung zu stellen, steht eine hohe Unsicherheit in der Technologieentwicklung gegenüber (vgl. Abschnitt 3.3). Auch hier besteht das Risiko von Fehlentscheidungen durch überzogenen Erwartungen an die Technologieentwicklung.

Bedingt durch die industriiefernen Einsatzbereiche, wie sie bei Servicerobotern in vielen Anwendungen der Fall sind, resultieren auch im Technologiefeld ASR *neuartige Anforderungen an Applikationen und Technologien* aus dem Einsatzbereich. Die meisten der bekannten Applikationen (vgl. Abschnitt 2.3.2) werden in nichtindustriellen Umgebungen und teilweise im direkten Umfeld von Fahrzeugkunden umgesetzt. Somit entsteht ein breites Kollektiv an neuen Herausforderungen. Beispiel hierfür sind die Bereiche der Normung und Standardisierung, da Festlegungen industrieller Bereiche wie DIN 10218 [33] oder ISO TS 15066 [70] nur begrenzte Gültigkeit besitzen [47]. Aber auch technische Anforderungen, wie eine Witterungsbeständigkeit über IP54 [32] hinaus für den Einsatz in urbanen Umgebungen, wie im Beispiel von E-SMARTCONNECT [189] dargestellt, erzeugen Handlungsbedarf auf Seiten der Roboterentwicklung.

Das *Zusammenspiel von Fahrzeug und Roboter* trägt ebenfalls zum Spannungsfeld bei. In der Applikationsentwicklung von ASR ist es nicht möglich, Fahrzeug und Roboter getrennt zu betrachten, da stets eine Interaktion zwischen Fahrzeug und Roboter stattfindet und eine integrative Applikationsentwicklung erfolgen muss. Auch die Berücksichtigung der Infrastruktur spielt insbesondere bei isolierten Automotive Service Robotern (vgl. Definition 2.3) eine wichtige Rolle und muss in die Gesamtbetrachtung integriert werden. Aus dem Zusammenspiel von Fahrzeug, Roboter und Infrastruktur resultiert der Bedarf für eine effiziente Schnittstellenabstimmung. Eine integrative Betrachtung ermöglicht es, Synergieeffekte zu nutzen und so ein optimiertes Gesamtsystem durch das Zusammenspiel von Fahrzeug und Roboter zu realisieren. Am Beispiel von E-SMARTCONNECT und der Robotertankstelle der TU-GRAZ (vgl. Abschnitt 2.3.2) lässt sich dieser Sachverhalt verdeutlichen. Für die Realisierung eines automatisierten Steckprozesses muss mindestens eine Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Roboter umgesetzt werden, um die Initiierung und den Abschluss des Steckvorgangs durch das Fahrzeug zu ermöglichen. Im Fall des Laderoboters der TU-GRAZ ist eine weitere mechanische Schnittstelle in das Fahrzeug

integriert. Hier öffnet das Fahrzeug selbstständig seine Ladeklappe und ermöglicht so den Verzicht auf eine Greiftechnik zum Öffnen der Klappe auf Roboterseite. Entsprechend kann ein Teil der Funktionalitäten ins Fahrzeug ausgelagert und die Komplexität des Robotersystems reduziert werden [107, 198, 199].

Aus dieser Art des Zusammenspiels zwischen Fahrzeug und Roboter resultiert auch der Bedarf für eine frühzeitige *fahrzeugseitige Schnittstellenintegration*. Bedingt durch die, im Gegensatz zur Robotik, langen Entwicklungszyklen auf Fahrzeugseite von oftmals mehreren Jahren, ist eine der Schlüsselaufgaben die frühzeitige Definition von Schnittstellenumfängen für die Fahrzeugentwicklung [13]. Somit kann sichergestellt werden, dass die applikationsrelevanten Schnittstellen zum richtigen Zeitpunkt in die Fahrzeuge implementiert werden und im Markt verfügbar sind. Eine frühzeitige Abschätzung der Schnittstellenumfänge ist jedoch durch die Komplexität des Themenfelds ASR nicht intuitiv möglich und unterstreicht den zuvor beschriebenen Bedarf nach einem methodischen Ansatz.

#### 2.4.1 Anforderungen aus dem Technologiefeld

Aufbauend auf den Ausführungen aus Abschnitt 2.4 ergeben sich verschiedene Handlungsbedarfe für ASR. Viele davon lassen sich auch auf ähnliche Technologiefelder übertragen, die sich in einer frühen Phase befinden und einem komplexen Anforderungskollektiv gegenübergestellt sind. Daher wird an dieser Stelle eine allgemeingültige Beschreibung der Anforderungen gewählt. So wird die Anwendbarkeit des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methodenansatzes auf andere Themenfelder gewährleistet. Der Fokus der Betrachtung liegt jedoch in der Anwendung auf das Technologiefeld ASR.

**Priorisierung von Technologieprojekten** Durch die frühe Phase, in der sich das Technologiefeld ASR befindet, stehen viele Handlungsalternativen zur Verfügung, und ein breites Portfolio zur Umsetzung von Applikationen muss berücksichtigt werden. Bedingt durch diese Vielzahl an Handlungsalternativen ist es notwendig, eine Priorisierung von Technologieprojekten im Sinne der Unternehmens- bzw. Technologiestrategie vorzunehmen. Durch die begrenzte Ressourcenverfügbarkeit (zeitlich, personell und monetär) gilt es zum einen, Schlüsseltechnologien innerhalb des Technologiefelds zu identifizieren, um eine zielgerichtete Bearbeitung der Technologieentwicklungsprojekte zu ermöglichen. Zum anderen muss frühzeitig eine Machbarkeitsabschätzung stattfinden, welche Applikationen zu welchem Zeitpunkt realisierbar sind, um überzogenen Zielstellungen in der Projektdurchführung entgegenzuwirken. Auch die langfristigen Planungshorizonte in der fahrzeugseitigen Schnittstellenintegration unterstreichen diesen Bedarf. So können relevante Schnittstellenumfänge bedarfsgesteuert aus den Roboterentwicklungsprojekten abgeleitet und in die Fahrzeugentwicklungsprozesse integriert werden.

**Berücksichtigung von Technology-Push- und Market-Pull-Ansätzen** Um sowohl marktseitige Bedarfe für neue Applikationen als auch neu entstehende Potenziale durch eine fortschreitende Technologieentwicklung zu berücksichtigen, muss eine geeignete Methode in der Lage sein, sowohl Technology-Push-Ansätze (technologiegetriebene Entwicklung) als auch Markt-Pull-Ansätze (bedarfsgetriebene Entwicklung) abbilden zu können. Zu berücksichtigen ist an dieser

Stelle, dass die Nachfrage nach neuen Applikationen und neuartige Technologieentwicklungen aus unterschiedlichen Funktionsbereichen des Unternehmens resultieren. Somit gilt es, diese frühzeitig zu synchronisieren und abzugleichen. Diese Anforderung überschneidet sich mit der zuvor formulierten Anforderung nach einem frühzeitigen Abgleich im Rahmen der Technologiepriorisierung.

**Berücksichtigung von Dynamik** Das Technologiefeld der Robotik ist durch eine hohe Entwicklungsdynamik geprägt, was sich in immer kürzeren Innovationszyklen ausdrückt [67, 68]. Diese dynamischen Entwicklungen müssen innerhalb des Methodenansatz berücksichtigt und eine regelmäßige Überarbeitung der Ergebnisse ohne zusätzlichen Aufwand ermöglicht werden. Somit wird sichergestellt, dass in entsprechenden Entscheidungssituationen eine aktuelle Informationsgrundlage gewährleistet ist. Zudem unterliegen auch die gestellten Anforderungen dynamischen Änderungen, die es zu berücksichtigen gilt. Gestützt wird diese Anforderung durch die frühe Phase des Technologiefelds ASR. In frühen Phasen stehen häufig nur qualitative Informationen als Entscheidungsgrundlage zur Verfügung. Diese werden jedoch mit fortschreitender Entwicklung immer weiter verdichtet und durch semi-quantitative und quantitative Informationen, wie beispielsweise technische Kennwerte, ergänzt [60]. Somit muss auch in der Informationsgrundlage eine Dynamik berücksichtigt werden.

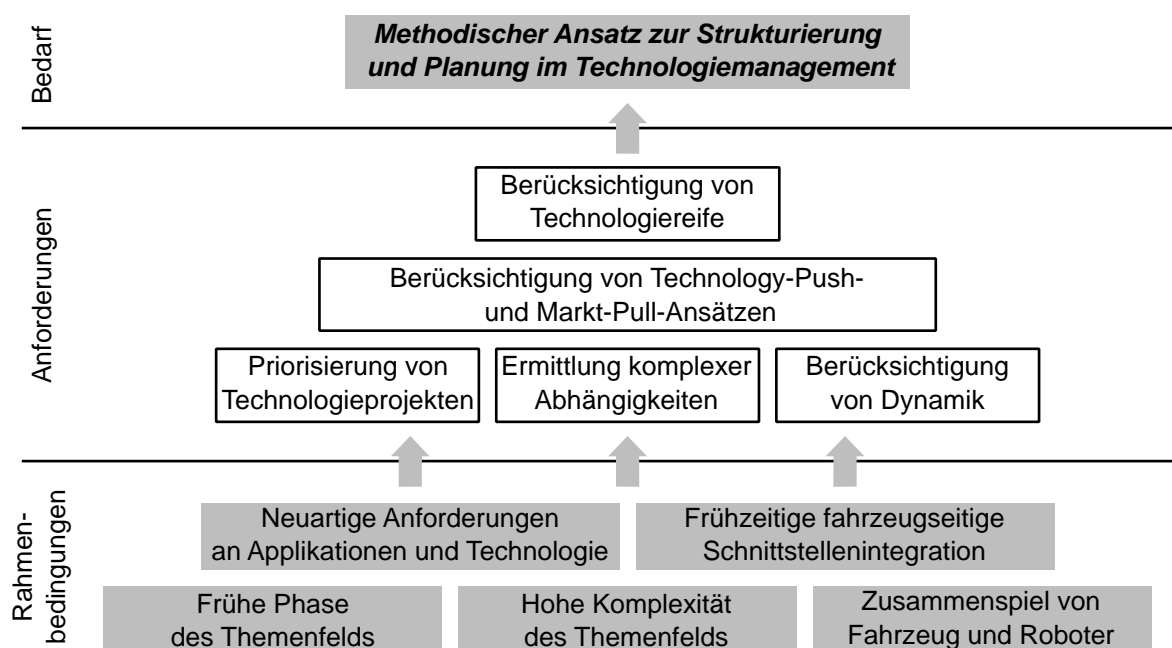
**Berücksichtigung von Technologiereife** Bei der Bewertung verschiedener Technologiealternativen ist es insbesondere in frühen Phasen wichtig, den Reifegrad der eingesetzten Technologie in die Bewertung einzubeziehen [72, 160]. So können eine klare Vorstellung für die Leistungsfähigkeit der Technologie gewährleistet und das Risiko überzogener Anforderungen vermieden werden. Diese Anforderung begründet sich z. B. in den neuartigen Anwendungsbereichen von ASR außerhalb klassischer Produktionsumgebungen (vgl. Abschnitt 2.4), für deren Realisierung der Einsatz neuartiger Technologien notwendig ist. Der Reifegrad dieser Technologien kann die Einsatzbereiche der Applikation limitieren.

**Ermittlung komplexer Abhängigkeiten** Durch die hohe Komplexität des Technologiefelds wie auch die frühe Phase, in der es sich befindet (vgl. Abschnitt 2.4), entsteht der Bedarf das Feld zu strukturieren und die prägenden Elemente zu identifizieren. Hierzu zählt auch die Identifikation von Schlüsseltechnologien innerhalb des Technologieportfolios. Voraussetzung ist es hierbei, die Abhängigkeitsverhältnisse innerhalb des Technologiefelds zu identifizieren und abzubilden, welche Technologien für welche Applikation relevant sind. Dies unterstützt die spätere Synchronisierung von Technologieprojekten.

Nachdem die aus dem Technologiefeld ASR resultierenden Herausforderungen definiert sind, gilt es, bestehende Lösungsansätze zur Adressierung genannter Problemstellungen zu identifizieren und mit den Anforderungen abzugleichen. Die Problemstellungen werden zunächst in die entsprechende Unternehmensaktivität eingeordnet, um den Suchraum für bestehende Ansätze zu reduzieren.

### 2.4.2 Einordnung der Problemstellung

In Abbildung 2.7 sind die Rahmenbedingungen des Technologiefelds ASR und die entstehenden Anforderungen und Bedarfe zusammengefasst. Die in Abschnitt 2.4.1 definierten Anforderungen zielen auf eine Strukturierung des Technologiefelds ab und verlangen nach einer Aussage über Fragestellungen in der Technologieauswahl, der Technologieleistungsfähigkeit und dem Technologietiming. Die übergeordnete Fragestellung, die es zu beantworten gilt, ist hierbei, zu welchem Zeitpunkt mit welcher Technologie welche Applikationen realisierbar sind und welche Technologieprojekte hierfür umzusetzen sind. So kann zum richtigen Zeitpunkt eine geeignete Reife der angestrebten Technologien sichergestellt werden. Die Fragestellungen müssen unter den zuvor genannten Anforderungen beantwortet werden. Hierzu bedarf es einer methodischen Herangehensweise, die in der Strukturierung und Planung unterstützt.



**Abbildung 2.7:** Zusammenfassung der Anforderungen und Bedarf für einen Methodenansatz

Einzuordnen sind diese Fragestellungen in die Unternehmensfunktion des Technologiemanagements. Dessen Aufgabe ist die Planung, Durchführung und Kontrolle der Entwicklung und Anwendung von Technologien durch den externen Erwerb oder interne Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten [15, 19, 184]. In Kapitel 3 werden daher die Grundlagen des Technologiemanagements dargestellt, um einen Überblick über seine Gesamtprozesse zu erhalten. Im Anschluss werden die vorhandenen Methodenansätze mit den Anforderungen aus Abschnitt 2.4.1 abgeglichen. Hierbei findet eine Fokussierung auf die Ansätze der strategischen Technologieplanung statt.

## 2.5 Zusammenfassung

Die aktuellen Entwicklungen von automatisierten Fahrfunktionen und die unterschiedlichen Automatisierungsstufen führen zu einem Mobilitätswandel. Vollautomatisierte Mobilitätssysteme sind eine mögliche Ausprägungsform zukünftiger Fahrzeugnutzungskonzepte. Die fortschreitende

Entwicklung von AFF und insbesondere das fahrerlose Fahren der Stufe 5 eröffnen eine Vielzahl von Möglichkeiten für zukünftige Mobilitätssysteme. Um den Entfall des Fahrers zu kompensieren und den steigenden Bedarf für fahrzeugorientierte Servicetätigkeiten zu decken, werden neuartige Servicekonzepte benötigt. Durch die Automatisierungstechnik, insbesondere die Robotik, besteht das Potenzial diese Bedarfe zu adressieren. Das Technologiefeld ASR befasst sich mit diesen Einsatzpotenzialen von Automatisierungslösungen für fahrzeugorientierte Servicetätigkeiten im Kontext automatisierter Fahrfunktionen und kann als Untergruppe der Service Robotik in Anlehnung an die DIN 8373 verstanden werden.

Erste Applikationen zeigen, dass durch den Einsatz von Automotive Service Robotern die Möglichkeit besteht, die neuartigen Anforderungen an Servicekonzepte zu erfüllen. Das Technologiefeld ASR befindet sich in einer frühen Entwicklungsphase und ist durch ein volatiles Umfeld geprägt. Es besteht der Bedarf für die methodische Priorisierung von Technologieprojekten bei gleichzeitiger Berücksichtigung von dynamischen Entwicklungsvorgängen, technologischen Reifegraden und komplexen Abhängigkeiten. Dieser Bedarf kann in den Forschungsbereich des Technologiemanagements eingeordnet werden. Im folgenden Kapitel werden bestehende Ansätze dargestellt und mit den Anforderungen an das Technologiemanagement verglichen.





### 3 Methodische Grundlagen des Technologiemanagements und Handlungsbedarf

Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung eines Methodenansatzes zur Unterstützung der strategischen Technologieplanung für neue Technologiefelder wie ASR (vgl. Abschnitt 1.4). Um die Voraussetzungen für die Erarbeitung eines geeigneten Ansatzes zu schaffen, werden in diesem Kapitel zunächst die theoretischen Grundlagen des Technologiemanagements und insbesondere der strategischen Technologieplanung erläutert. Hierzu werden relevante Begrifflichkeiten des Technologiemanagements in Abschnitt 3.1 beschrieben. Anschließend erfolgt eine Einordnung des Technologiemanagements in den Produktlebenszyklus und die Abgrenzung zu anderen Managementbereichen (vgl. Abschnitt 3.2). Danach folgt die Erläuterung der Aufgaben und Ziele des Technologiemanagements und seiner Teilfunktionen in Abschnitt 3.3. Den Abschluss des Kapitels bildet ein Überblick über die existierenden Methoden des Technologiemanagements (vgl. Abschnitt 3.4) und die Bewertung dieser Methoden im Kontext der in Abschnitt 2.4 beschriebenen Anforderungen, sowie die Konkretisierung des Handlungsbedarfs für die weitere Methodenentwicklung (vgl. Abschnitt 3.6).

#### 3.1 Begriffliche Grundlagen

In diesem Abschnitt wird eine Definition des Technologie-, Produkt- und Innovationsbegriffs vorgenommen und eine Abgrenzung zu den Begriffen Technik und Invention beschrieben, um eine begriffliche Grundlage für die vorliegende Arbeit zu schaffen. Ferner werden verschiedene Möglichkeiten zur Kategorisierung von Technologie vorgestellt und das Konzept des Technologiereifegrads erläutert.

##### 3.1.1 Technologie und Technik

Der Begriff der *Technologie* ist eine Zusammensetzung aus den griechischen Begriffen „*techne*“ (etwa: Kunst oder Handwerk) und „*logos*“ (Lehre, Wissenschaft) abgeleitet und kann mit Anwendungswissen oder Kunstfertigkeit übersetzt werden [134]. In der Literatur werden die Begriffe der *Technologie* und *Technik* nicht einheitlich verwendet. Es wird zwischen dem traditionellen und integrativen Begriffsverständnis unterschieden, welche sich in der Umfänglichkeit der Begriffe unterscheiden [10, 152].

Im traditionellen Begriffsverständnis bezeichnet der Begriff *Technologie* die Wissenschaft von der *Technik*, also das naturwissenschaftlich-technische Wissen über Lösungswege zur Umsetzung eines technischen Problems [19]. Technologie entsteht als Ergebnis einer Technologieentwicklung. Die Technologieentwicklung baut auf einer Theorie auf, die vorher in der Grundlagenforschung untersucht wurde. Technologie stellt dementsprechend die Ausgangsbasis für die Entwicklung von Verfahren und Produkten dar. Die aus dem Problemlösungsprozess resultierenden Ergebnisse

werden als Technik bezeichnet und stellen konkrete Anwendungen einer oder mehrerer Technologien zur gezielten Problemlösung dar [152]. Diesem Ansatz folgend ist Technik nach BULLINGER das „materielle Ergebnis eines Problemlösungsprozesses, in Form realisierter Produkte, Betriebsmittel und Materialien“ [9, 19]. Als Problemlösungsprozesse werden die angewandte Forschung sowie die Produkt- und Prozessentwicklung verstanden. Es besteht eine strikte Trennung zwischen Technologie und Technik.

In der Praxis ist eine solche Abgrenzung jedoch nicht immer möglich. So lässt sich beispielsweise ein additiv hergestellter Prototyp nicht eindeutig in Technologie oder Technik einordnen. Das später entwickelte integrative Begriffsverständnis erweitert das traditionelle Verständnis. Hier wird Technik als Untersystem der Technologie verstanden und die strikte Trennung von Technologie als Wissen und Technik als ihre Anwendung aufgehoben [152]. Nach BINDER und KANTOWSKY umfasst Technologie das Wissen, die Kenntnisse und die Fertigkeiten zur Realisierung technischer Probleme, sowie Anlagen und Verfahren zur praktischen Umsetzung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse [10]. Der Begriff der Technik wird in den Begriff Technologie integriert. Für den weiteren Verlauf der Arbeit wird das integrative Begriffsverständnis von Technologie und Technik verwendet.

Eine Kategorisierung von Technologien kann nach verschiedenen Kriterien vorgenommen werden. Die für diese Arbeit wichtigsten Merkmale werden im Folgenden kurz erläutert. Im Kriterium der *Funktion* kann zwischen Produkt- und Prozesstechnologien unterschieden werden. Dieses in der Praxis am weitesten verbreitete Kriterium differenziert Produkttechnologien, die integraler Bestandteil eines kommerziell vertriebenen Produkts sind, von Prozesstechnologien, die vornehmlich der Entstehung von Produkten dienen [19, 207]. Die *Wettbewerbsrelevanz* und das *Potenzial* charakterisieren Technologien in ihrer strategischen Bedeutung für die zukünftige Unternehmensentwicklungen. Bei der Wettbewerbsrelevanz wird zwischen neuen, Schrittmacher-, Schlüssel- und Basistechnologien unterschieden [19]. Das *Potenzial* einer Technologie gibt hingegen an, welche Weiterentwicklungsmöglichkeiten eine Technologie noch besitzt, bevor sie ihren maximalen Ausschöpfungsgrad erreicht [55, 58]. Die Beschreibung der *Lebenszyklusphase* lehnt sich an das Lebenszyklusmodell von ARTHUR D. LITTLE an, nach dem Technologien im Laufe ihres Lebens die Phasen von Entstehung, Wachstum, Reife und Alter durchlaufen. Ähnlich wie bei den Kategorien Wettbewerbsrelevanz und Potenzial werden Technologien anhand des Ausschöpfungsgrads des Technologiepotenzials in die verschiedenen Lebenszyklusphasen eingeordnet [19, 98, 152]. Darüber hinaus existieren weitere Möglichkeiten zur Kategorisierung von Technologien. In Anhang A.3 ist eine detaillierter Übersicht mit den in der Literatur am häufigsten verwendeten Kriterien und den entsprechenden Ausprägungen dargestellt.

Neben der Lebenszyklusphase nach LITTLE können Technologien während ihrer Entstehungsphase durch den sogenannten *Technologiegreifegrad* (TRL) differenziert werden. Diese Unterscheidung ist in frühen Phasen der Technologieentwicklung von besonderer Bedeutung, da noch keine Marktdurchdringung stattgefunden hat und die technische Leistungsfähigkeit im Vordergrund steht. Die Kategorisierung von Technologien nach ihren Reifegraden wurde in den 1990er Jahren von der NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA) zur Bewertung von Raumfahrttechnologien eingeführt [100] und durch die DIN ISO 16290 [37] auch für den europäischen Raum adaptiert. Nach dem TRL-Konzept durchlaufen Technologien während ihrer Entstehungsphase neun Stufen, die sich durch den Umfang der realisierten Funktionalitäten unterscheiden. In Tabelle 3.1 ist eine Übersicht über die Reifegradstufen und die

entsprechenden Funktionsumfänge in Anlehnung an die Definition der NASA [100] dargestellt. Die Reifegradstufen 1 bis 2 umfassen die technologische Grundlagenforschung, in der noch keine technische Machbarkeit in der Anwendung nachgewiesen ist. Durch den Nachweis der technischen Machbarkeit ausgewählter Funktionen und Komponenten wird der Reifegrad weiter gesteigert. Ab einem Technologiereifegrad von 6 wird erstmalig die Phase der Systementwicklung erreicht, in der alle relevanten Funktionen in einem Modell oder Prototypen untersucht werden.

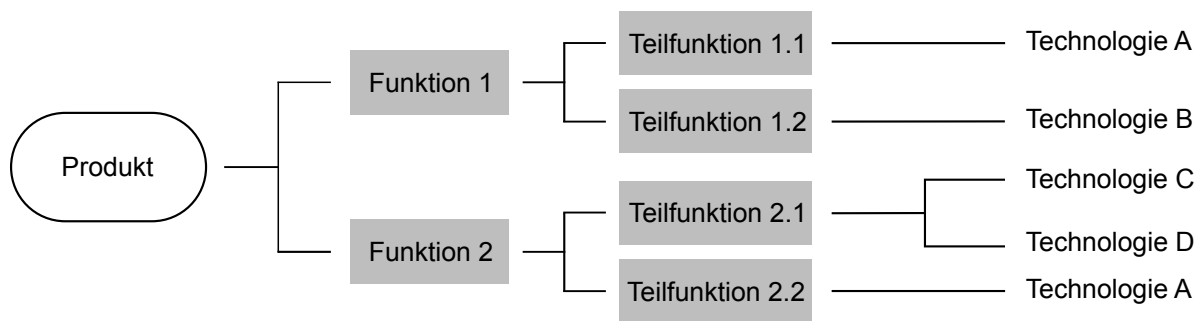
**Tabelle 3.1:** Übersicht verschiedener Technologiereifegrade nach Definition der NASA [37, 100]

Technologiereifegrad	NASA-Definition
TRL 1	Grundlegende Prinzipien beobachtet und dokumentiert
TRL 2	Formulierung des technischen Konzepts und der Anwendung
TRL 3	Analytischer/experimenteller Machbarkeitsnachweis bei kritischen Funktionen
TRL 4	Validierung der Komponenten und/oder des Versuchsaufbaus in Laborumgebung
TRL 5	Validierung der Komponenten und/oder des Versuchsaufbaus in relevanter Umgebung
TRL 6	System-, Subsystemmodell oder Prototypendemonstration in relevanter Umgebung
TRL 7	Prototypendemonstration in All-Umgebung
TRL 8	Endgültiges System vollständig und flugfähig, nachgewiesen durch Test und Demonstration
TRL 9	Endgültiges System flugerprobt und erfolgreich im Einsatz

Ab einem Technologiereifegrad von 8 wird von einem Systemtest gesprochen, in dem erstmalig der Einsatz des endgültigen Systems in allen relevanten Umgebungen erprobt wird. Aufbauend auf dieser Terminologie erfolgten verschiedenste Verallgemeinerungen, um die Anwendung des TRL-Konzepts auf andere Technologiebereiche zu ermöglichen. Der Vorteil des Bewertungssystems von Technologiereifegraden liegt in der Definition eines gemeinsamen Verständnisses für die Reife von Technologien innerhalb von Projektteams [159].

### 3.1.2 Produkt und Produktlebenszyklus

Nach EHRENSPIEL ist ein Produkt ein „künstlich erzeugtes geometrisch-stoffliches Gebilde, das einen bestimmten Zweck (Funktion) erfüllt [...]“ [41]. Produkte sind technische Systeme und weisen einen hierarchischen Aufbau und Systemgrenzen auf [41]. Dieser Definition folgend lässt sich ein Produkt als das Ergebnis der Anwendung von Technologien am Ende eines Produktentstehungsprozesses beschreiben. Durch den Einsatz verschiedener Technologien realisieren Produkte mehrere Funktionen und lassen sich sowohl über ihre technische Umsetzung als auch über die realisierten Funktionen beschreiben [41].



**Abbildung 3.1:** Zusammenhang von Produkt, Funktion und Technologie, in Anlehnung an [162]

Bei der Betrachtung der Produktarchitektur wird zwischen der Funktionsstruktur, der funktionalen Produktbeschreibung, und der Produktstruktur, der physischen Produktbeschreibung mit Baugruppen und Komponenten, unterschieden [153]. Bei den in einem Produkt realisierten Funktionen kann zwischen Haupt- und Nebenfunktionen unterschieden werden und jede Funktion zudem in Teilfunktionen untergliedert werden [119, 153]. Der vereinfachte Zusammenhang zwischen Produkt, Funktion und Technologie ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

Innerhalb eines Produktlebens werden unterschiedliche Phasen unterschieden. In Abbildung 3.2 ist ein solcher Produktlebenszyklus aus technischer Sicht in Anlehnung an die VDI 2221 [184] dargestellt. Produkte durchlaufen zunächst die Phase der Produktplanung, in der das zu entwickelnde Produktportfolio in Abhängigkeit von internen und externen Kontextfaktoren gestaltet wird [41, 184]. Im Anschluss werden im Prozess der Produktentwicklung diese Produktideen anhand eines Pflichtenhefts in technische Realisierungen überführt. Die klassischen Begriffe Entwickeln und Konstruieren sind dieser Phase des Produktlebenszyklus zuzuordnen [44].



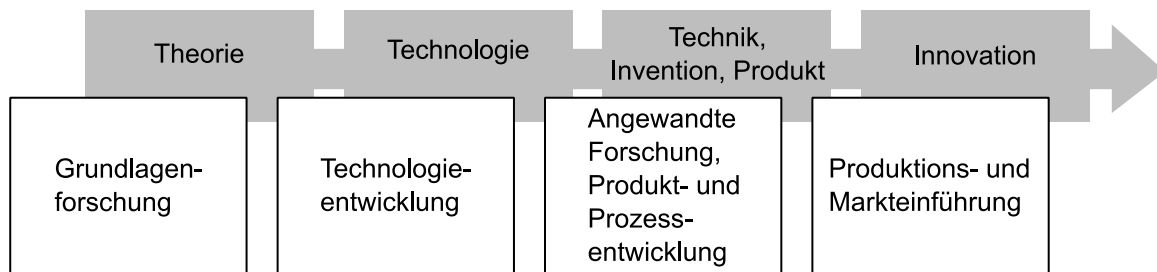
**Abbildung 3.2:** Bestandteile eines Produktlebenszyklus, in Anlehnung an [184]  
(wiedergegeben mit Erlaubnis des Verein Deutscher Ingenieure e. V.)

Hieran schließt sich die Phase der Realisierung und Produktion an, die durch verschiedene Tätigkeiten wie der Prozessentwicklung im Vorfeld einer Serienproduktion ergänzt werden [184]. Die Phasen Produktplanung, Produktentwicklung und Realisierung/Produktion werden auch als Produktentstehung bezeichnet, an deren Ende erstmalig von einem Produkt gesprochen werden kann [184]. Den Abschluss des Produktlebenszyklus bilden die Phasen der Produktnutzung und das Ende des Produktlebens.

### 3.1.3 Innovation und Invention

Eine weitere Unterscheidung muss bei den Begriffen Innovation und Invention vorgenommen werden. Unter einer *Invention* wird die technische Realisierung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse oder die Kombination von bestehenden wissenschaftlichen Erkenntnissen verstanden [182]. Sie ist das Ergebnis angewandter Forschung und Entwicklung und bildet eine Vorstufe zu einer

Innovation [162]. Bei einer Invention kann auch von einem Produkt gesprochen werden. Unter einer *Innovation* wird hingegen die Markteinführung und auch Marktdurchdringung von Entwicklungsergebnissen in Form von Produkten und Verfahren beschrieben [182]. Im Fokus steht der wirtschaftliche Einsatz einer Invention zur Erreichung der Unternehmensziele [121]. Zwischen Innovation und Invention steht eine (erfolgreiche) Produktions- und Markteinführung [38, 162].



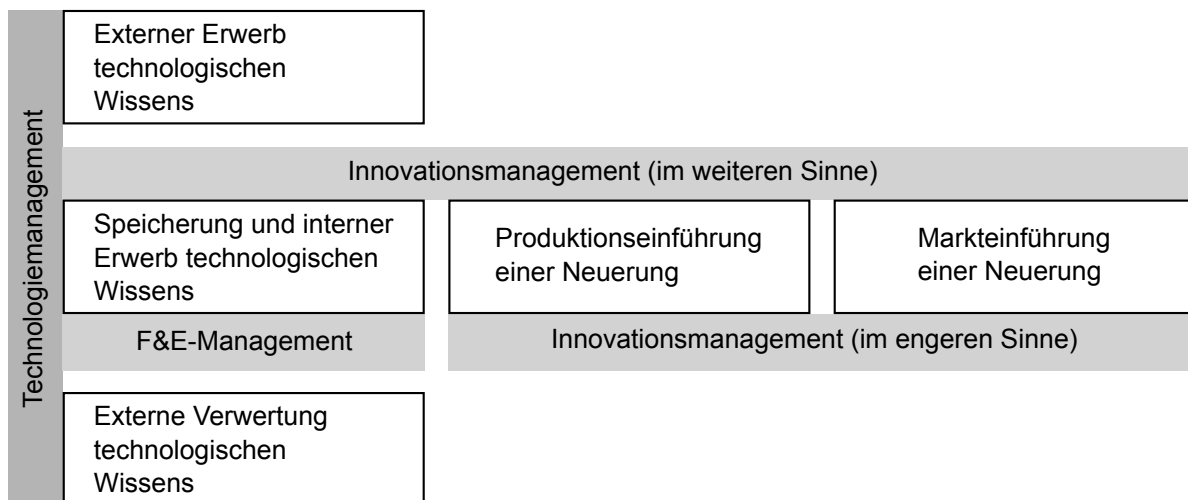
**Abbildung 3.3:** Einordnung von Technologien und Innovationen in die Produktentstehung, in Anlehnung an [163]

Das aus der Grundlagenforschung resultierende Wissen über die Theorie wird durch die Technologieentwicklung in technologisches Wissen überführt. Im Anschluss an die Problemlösungsprozesse von angewandter Forschung, Produkt- und Prozessentwicklung entsteht aus diesem Wissen Technik in Form von einem Produkt. An dieser Stelle kann dieses Produkt als eine Invention angesehen werden. Durch die Produktions- und Markteinführung wird die Invention dann in eine Innovation überführt. [162]

## 3.2 Eingrenzung des Technologiemanagements

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Ansatz zu entwickeln, der die Technologieplanung als Teil des Technologiemanagements für neuartige Technologiefelder wie ASR unterstützt. Um diese Methodik zielgerichtet entwickeln zu können, ist es zunächst nötig, eine Einordnung der strategischen Technologieplanung in den Produktlebenszyklus vorzunehmen. Durch diese Einordnung kann ein Verständnis für die Ziele und Aufgaben der Technologieplanung geschaffen werden. Weiterhin wird durch die Betrachtung der Inhalte und aktuell eingesetzter Methoden die Zielsetzung für die spätere Entwicklung des Methodenansatzes weiter präzisiert. Im folgenden Abschnitt wird daher eine Einordnung des Technologiemanagements und eine Abgrenzung zum Innovations- und Forschungs- und Entwicklungs- (F&E)-Management vorgenommen. Aufbauend hierauf können im nächsten Abschnitt die Inhalte und Aufgaben des Technologiemanagements weiter detailliert und insbesondere die strategische Technologieplanung intensiver betrachtet werden.

In einem Unternehmen werden die Aktivitäten des Produktlebenszyklus (vgl. Abschnitt 3.1.2) durch verschiedene Querschnittsfunktionen begleitet, die insbesondere in der Phase der Produktentwicklung einen unterstützenden Charakter besitzen. Eine wichtige Funktion bildet das Technologiemanagement, da Technologien die Grundlage für eine Produktentwicklung bilden (vgl. Abbildung 3.3). Weitere Funktionen sind das Innovationsmanagement als Teil des Produktmanagements und das F&E-Management. Die Ausführungen in Abschnitt 3.1 zeigen, dass ein enger Zusammenhang zwischen Technologie, Produkt, Innovation und Forschungs- und Entwicklung besteht und auch die jeweiligen Managementfelder Schnittmengen aufweisen. Das



**Abbildung 3.4:** Abgrenzung des Technologiemanagements zum Innovations- und F&E-Management, in Anlehnung an [170]

Innovationsmanagement als Teil des Produktmanagements umfasst die systematische Planung, Steuerung und Kontrolle von explizit neuen Ideen oder Erfindungen mit hohem Innovationspotenzial. Es zielt damit auf die Überführung von Technologien und Produktideen in erfolgreiche Produkte und die marktwirtschaftliche Verwertung dieser Produkte ab [31].

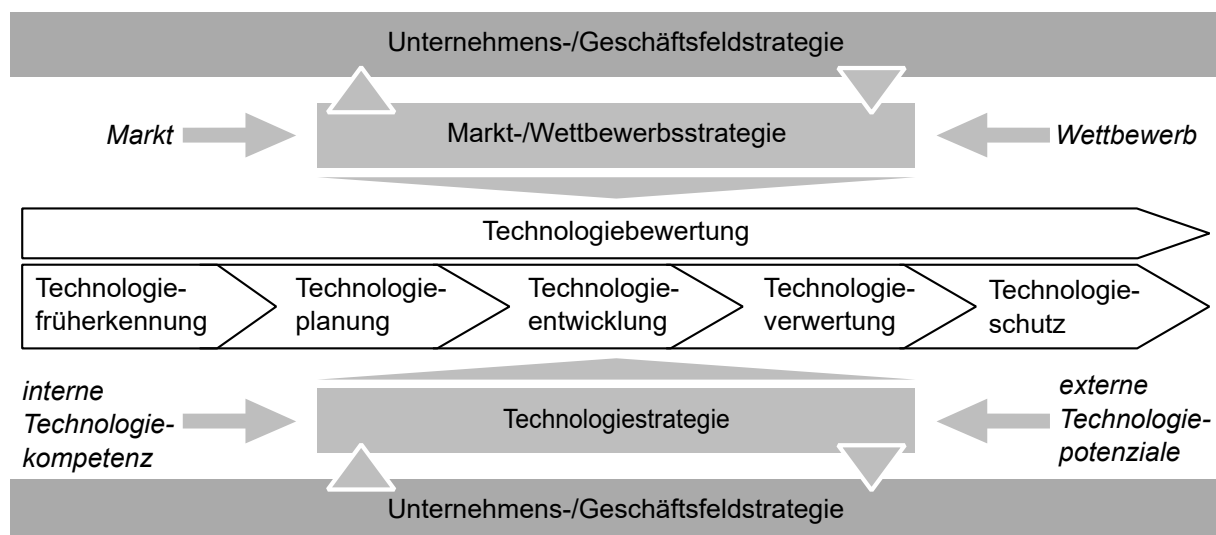
Als Betrachtungsgegenstand stehen beim Innovationsmanagement neuartige Produkte im Vordergrund. Darüber hinaus werden organisatorische Innovationen innerhalb des Unternehmens betrachtet [182]. Im Technologiemanagement hingegen steht die Planung, Durchführung und Kontrolle der Entwicklung und Anwendung von Technologien im Vordergrund mit dem Ziel, hieraus Wettbewerbsvorteile zu schaffen [19, 184]. Hierzu kann zum einen der externe Erwerb von technologischem Wissen, zum anderen die externe Verwertung dieses technologischen Wissens gezählt werden [15]. Die Schnittstelle zwischen Technologie- und Innovationsmanagement stellt das Forschungs- und Entwicklungsmanagement dar. Es beschäftigt sich mit der Speicherung und dem internen Erwerb technologischen Wissens, also der Schaffung technologischer Innovationen [15]. Hierbei unterscheidet es sich auch in seiner Ausrichtung. Während Technologie- und Innovationsmanagement als prozessorientierte Querschnittsfunktionen zur Unterstützung der Produktentstehung gesehen werden können, handelt es sich beim F&E-Management um eine unternehmensinterne, funktionsorientierte Managementtätigkeit [58]. Der Zusammenhang und die Schnittmengen von Technologie-, Innovations- und F&E-Management sind in Abbildung 3.4 dargestellt.

### 3.3 Inhalte und Aufgaben des Technologiemanagements

In den vorangegangenen Abschnitten wird das Technologiemanagement von verschiedenen Unternehmensfunktionen abgegrenzt. Im nächsten Schritt gilt es, die Aufgaben und Inhalte näher zu beschreiben. Hierzu werden zunächst die Bereiche des normativen, operativen und strategischen Technologiemanagements erläutert. Aufbauend hierauf werden die Phasen des Technologiemanagements beschrieben. Die Beschreibungen orientieren sich an den Ausführungen von SCHUH und

KLAPPERT [155]. Das Technologiemanagement lässt sich in eine normative, strategische und operative Ebene unterteilen. Kern des *normativen Technologiemanagements* ist die grundlegende Ausrichtung des Unternehmens im Hinblick auf die technologische Entwicklung und die daraus folgende Ableitung der Technologiepolitik [19, 177]. Diese kann in Form eines Technologieleitbilds für das Unternehmen festgehalten werden und bildet die Grundlage für das strategische und operative Ebene. Darüber hinaus wird die organisatorische und kulturelle Ausrichtung des Unternehmens im Sinne einer offenen Innovationskultur gestaltet [19, 152, 207].

Im Rahmen des *strategischen Technologiemanagements* liegt der Fokus der Betrachtung auf der Schaffung und Nutzung von technologischen Potenzialen, um die strategische Ausrichtung des Unternehmens zu ermöglichen [1, 19]. Hierzu werden aus der Technologiepolitik des Unternehmens einzelne Technologiestrategien (vgl. Abschnitt 3.3.1) abgeleitet. So werden beispielsweise „make or buy“-Entscheidungen, also die Entscheidung über Eigenfertigung oder Fremdbezug, getroffen. Das *operative Technologiemanagement* umfasst als dritte Säule des Technologiemanagements alle Tätigkeiten, die eine operative Umsetzung der formulierten Strategie betreffen [1, 19, 177]. Die in der strategischen Ebene geschaffenen Erfolgspotenziale werden in einen tatsächlichen Erfolg überführt [19]. In Anhang A.4 sind die Inhalte der verschiedenen Ebenen vergleichend gegenübergestellt.



**Abbildung 3.5:** Phasen des Technologiemanagements, in Anlehnung an [155]

Neben den genannten Ebenen kann das Technologiemanagement in unterschiedliche Phasen unterteilt werden, die in Abbildung 3.5 aufgezeigt sind. Im Rahmen der Technologiefrüherkennung werden die Entwicklungen der Unternehmensumwelt betrachtet und die hieraus entstehenden Chancen und Risiken für die Unternehmensentwicklung abgeleitet [106, 207]. Die detaillierten Inhalte der Technologiefrüherkennung sind in Anhang A.6 beschrieben. In Anlehnung an die Früherkennung werden in der Technologieplanung Vorgaben für die Entwicklung und Verwertung entwickelt und auch die Ausrichtung des Unternehmens festgelegt [151]. Diese Vorgaben werden anschließend in der Technologieentwicklung umgesetzt. Ziel ist die anwendungstaugliche Entwicklung von Produkt- oder Prozesstechnologien [76] und der Aufbau einer technologischen Wissensbasis [106]. In Anhang A.8 sind die Inhalte dieser Phase umfassend beschrieben.



Die Technologieverwertung legt anschließend ihren Fokus auf die finanzielle Verwertung der entwickelten Technologien. Dies kann unternehmensintern im Rahmen neuer Produkte oder unternehmensextern, beispielsweise durch Lizenzierung, erfolgen [149]. Im Rahmen von Anhang A.9 sind die Inhalte der Technologieverwertung ausführlich beschrieben. Den Abschluss bildet der Technologieschutz, der darauf abzielt, das entwickelte technologische Know-How des Unternehmens vor dem Wettbewerb zu schützen (vgl. Anhang A.10). Die Technologiebewertung unterstützt in verschiedenen Entscheidungssituationen durch geeignete Bewertungsmethoden und stellt eine Querschnittsfunktion dar. Je nach Zielstellung und Zeitpunkt der Bewertung werden, durch den Einsatz von qualitativen und quantitativen Methoden, systematische Entscheidungsgrundlagen erarbeitet und reproduzierbare Entscheidungen ermöglicht [60]. Im Rahmen von Anhang A.11 sind die Inhalte der Technologiebewertung eingehend beschrieben.

Einen weiteren wichtigen Baustein des Technologiemanagements, der insbesondere in der normativen Ebene betrachtet wird, stellt die Technologiestrategie dar. Sie bildet die Leitlinien des Technologiemanagements und ist eng mit der Unternehmens- oder Geschäftsfeldstrategie sowie der Markt- und Wettbewerbsstrategie verbunden [155]. Da diese Arbeit auf die Entwicklung eines Methodenansatzes für die Phase der Technologieplanung abzielt (vgl. Abschnitt 1.4), wird diese Phase im Folgenden detailliert betrachtet. Ebenso wird näher auf das Element der Technologiestrategie eingegangen, da diese die Grundlage für eine Technologieplanung darstellt (vgl. Abbildung 3.5).

### *3.3.1 Technologiestrategie*

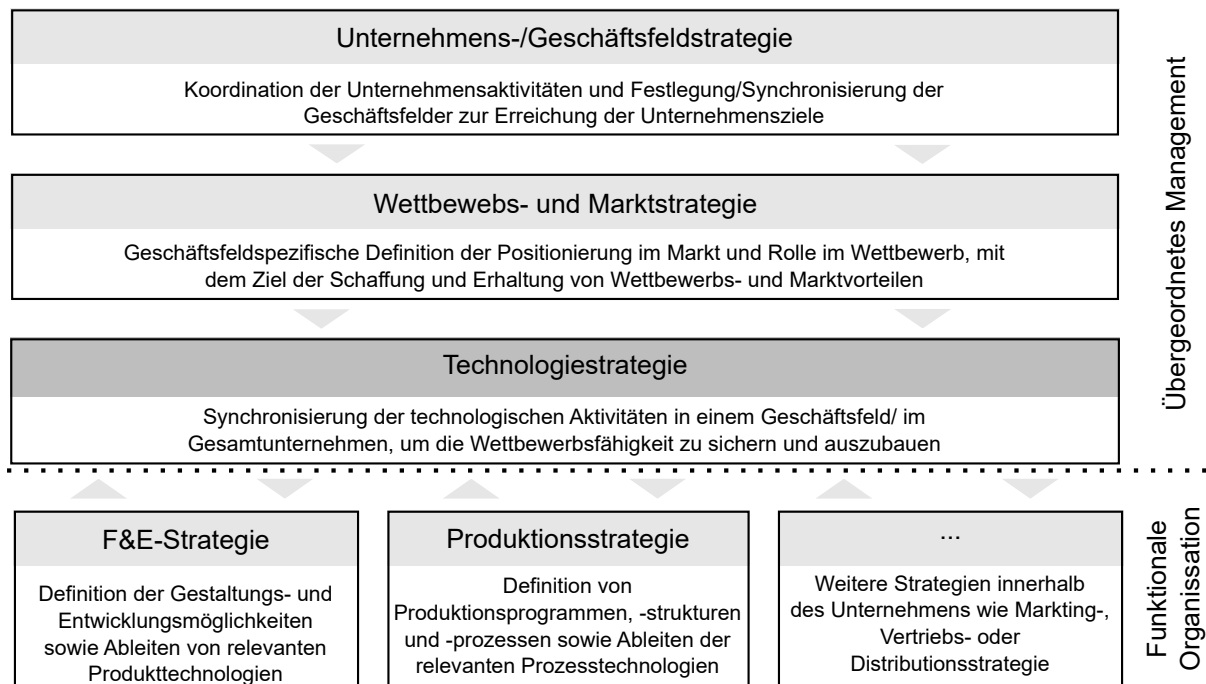
Zentrales Element des Technologiemanagements, auf das alle Entscheidungen und Handlungen zurückzuführen sind, ist die Technologiestrategie. Sie wird aus der Unternehmens- und Geschäftsfeldstrategie sowie der Markt- und Wettbewerbsstrategie eines Unternehmens abgeleitet. Die Unternehmensstrategie stellt die übergeordnete Leitlinie für alle Aktivitäten innerhalb eines Unternehmens dar und ist die Basis für alle hieraus abgeleiteten Teilstrategien [98, 155]. In der Technologiestrategie ist nach DOWNLING [40] beschrieben,

- welche Technologien verwendet werden (Technologieauswahl),
- zu welchem Zweck die Technologien verwendet werden (Technologieverwertung),
- welches technologische Leistungsniveau erreicht/angestrebt wird (Leistungsfähigkeit),
- welcher Einsatzzeitpunkt für die Technologien gewählt wird (Technologietiming) sowie
- woher die Technologien bezogen werden (Technologiequelle).

Somit wird festgelegt, wie sich die Technologiepotenziale des Unternehmens zukünftig entwickeln und welche Ressourcen und Fähigkeiten hierfür benötigt werden [10].

Für jedes Geschäftsfeld lässt sich eine eigene Geschäftsfeldstrategie deduzieren, die Inhalte der Unternehmensstrategie auf geschäftsfeldspezifische Themen herunterbricht und marktbezogene Fragestellungen adressiert [135]. Innerhalb dieser Strategien wird definiert, wie die Positionierung in Markt und Wettbewerb erfolgt. Dementsprechend entstehen hieraus die Markt- und Wettbewerbsstrategien der Geschäftsfelder [98]. Die Technologiestrategie baut hierauf auf und konkretisiert die technologischen Ziele, um die angestrebte Position in Markt und Wettbewerb zu erreichen [164]. Die Erstellung von Technologie-, Markt-, Wettbewerbs- oder Geschäftsfeldstrategien erfolgt aufgrund starker Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Strategien zumeist

integrativ, um beispielsweise die technologische Realisierbarkeit von Marktpositionen bereits frühzeitig in die Entscheidungsfindung einfließen zu lassen oder rechtzeitig die Technologiebasis für angestrebte Marktpositionen bereitzustellen [155]. Die einzelnen Technologiestrategien der Geschäftsfelder müssen miteinander synchronisiert werden, um potenzielle Synergieeffekte nutzen zu können. In den meisten Unternehmen erfolgt dies in Form einer Gesamttechnologiestrategie über alle Geschäftsfelder [164].

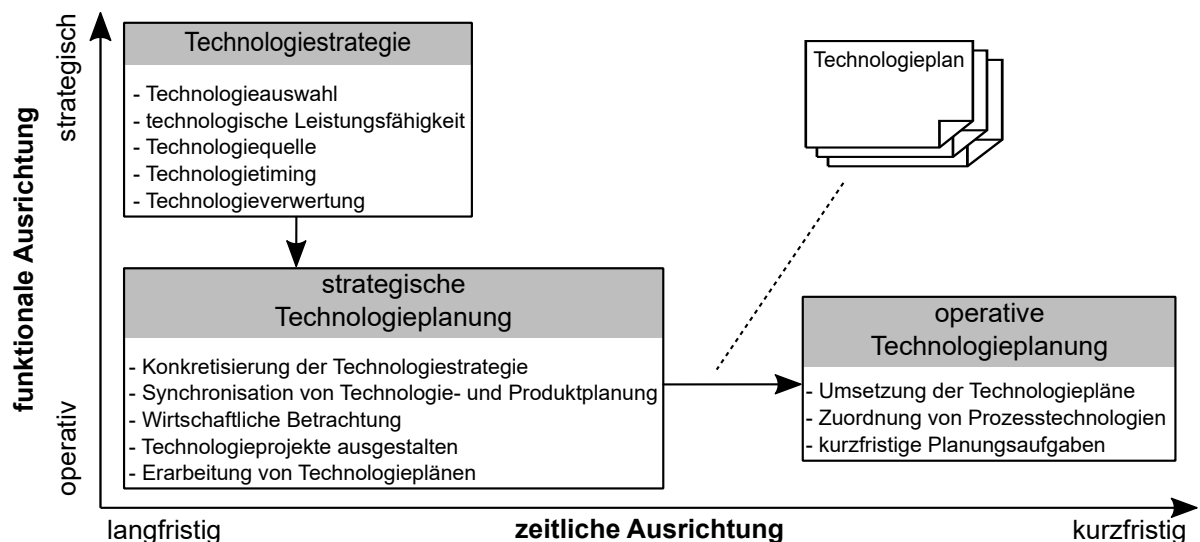


**Abbildung 3.6:** Kontext der Technologiestrategie, in Anlehnung an [155]

In Abbildung 3.6 sind die Zusammenhänge zwischen einzelnen Strategien innerhalb eines Unternehmens dargestellt. Dies verdeutlicht die Komplexität bei der Erstellung einer Technologiestrategie. Neben einer Abhängigkeit zu übergeordneten Strategien besteht eine Abhängigkeit zu den Strategien der funktionalen Bereiche des Unternehmens. Die Bereiche Forschung und Entwicklung, Produktion oder Marketing erarbeiten jeweils eigene Funktionalstrategien, ebenfalls orientiert an der Geschäftsfeld- oder Wettbewerbs-/Marktstrategie. Diese Funktionalstrategien müssen mit der Technologiestrategie in Einklang gebracht werden [155]. Der Fokus der F&E liegt primär auf der Identifikation und Entwicklung von Produkttechnologien, wohingegen die Produktion auf Prozesstechnologien orientiert ist (vgl. Abschnitt 3.1). Die Funktionalstrategien dieser Bereiche definieren den Umgang mit den entsprechenden Produkt- bzw. Prozesstechnologien. Die Technologiestrategie fungiert entsprechend als Querschnittsstrategie, da sie über alle Funktionalstrategien hinweg abgestimmt wird und die Inhalte in einen Gesamtkontext zur Erreichung der übergeordneten Unternehmensziele bringt [155]. Das Vorgehen zur Bildung und Umsetzung der Technologiestrategie wird in Anhang A.5 im Detail beschreiben.

### 3.3.2 Technologieplanung

Das Bindeglied zwischen Technologiefrüherkennung und -entwicklung stellt die Technologieplanung dar. Diese überführt die in der Technologiestrategie definierten Unternehmensziele in eine operative Planung. Als Kernfrage gilt es zu beantworten, welche Technologien zu welchem Zeitpunkt zur Verfügung gestellt werden, um die Unternehmensziele zu erreichen [151]. Hierbei ist sowohl eine langfristige Betrachtungsweise zur strategischen Ausrichtung des Unternehmens anzusetzen als auch eine kurzfristige Betrachtungsweise zur Umsetzung dieser Ausrichtung [42]. Ziel ist es, den Einsatz und die Entwicklung von Technologien sowie die externe Technologiebeschaffung im Unternehmen zu koordinieren und mit der Produktplanung zu synchronisieren. Die Technologieplanung wird daher auch als Kern des Technologiemanagements betrachtet, da die Ausgangsbasis für technologische Entwicklungsrichtung des Unternehmens definiert wird [42, 151]. Ferner kann zwischen der strategischen und operativen Technologieplanung unterteilt werden. In Abbildung 3.7 sind die Inhalte und Zusammenhänge zwischen Technologiestrategie und strategischer bzw. operativer Technologieplanung dargestellt.



**Abbildung 3.7:** Funktionale und zeitliche Einordnung von strategischer und operativer Technologieplanung

Die *strategische Technologieplanung* hat zum Ziel, die langfristige Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens zu sichern [45]. Kern der Betrachtung sind die Analyse von Trends und die Bewertung von Kunden- und Marktanforderungen zur Entwicklung von *Technologieplänen* [42, 151]. Die Technologiepläne überführen die in der Technologiestrategie (vgl. Abschnitt 3.3.1) allgemein beschriebenen Ziele zur Unternehmensentwicklung in konkrete Umsetzungsvorgaben und Projekte [151]. Während in der Technologiestrategie Technologiefelder definiert werden, konkretisiert die strategische Technologieplanung die Ziele für einzelne Technologien. In den Plänen wird definiert, welche Technologien zukünftig zu welchem Zweck eingesetzt und ob die Technologien intern entwickelt oder extern beschafft werden sollen [155]. Hierbei findet auch eine Bewertung im Hinblick auf Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit statt. Die externe Beschaffung ist durch den langfristigen Planungshorizont möglich, da der zeitintensive Aufbau von Know-how und Strukturen zu diesem Zeitpunkt noch umsetzbar ist [42]. Jedoch unterliegen die Technologiepläne im Gegensatz zur Technologiestrategie deutlich kürzeren Überarbeitungszyklen, um

die Veränderungen der Technologielandschaft zu berücksichtigen. Die strategische Technologieplanung erfolgt in enger Abstimmung mit der Produktplanung. So können Produktinnovationen durch geeignete Technologieinnovationen begleitet werden. Bedingt durch die langfristige Betrachtungsweise ist die strategische Technologieplanung von einem hohen Maß an Unsicherheit geprägt [151].

In der *operativen Technologieplanung* wird die kurzfristige Planung der Umsetzung der Technologiepläne verfolgt. Hierzu zählen beispielsweise die Zuordnung von Fertigungstechnologien zu Prozessschritten in der Produktion [42, 151]. Folglich resultiert eine starke Koppelung an die Produktentwicklung in Unternehmen [19] und die Umsetzung direkter Produktvorgaben. Durch den betrachteten kurzfristigen Planungshorizont ist die operative Technologieplanung von einem geringeren Maß an Unsicherheiten geprägt [151]. Jedoch können nur die im Unternehmen intern vorhandenen Technologien berücksichtigt werden, da eine externe Beschaffung den Planungshorizont überschreitet. Als Ergebnis entstehen spezifizierte und realisierbare Vorgaben für die Technologieentwicklung. Die Unterschiede zwischen strategischer und operativer Technologieplanung sind in Anhang A.7 gegenübergestellt [151, 164].

### 3.4 Methoden des Technologiemanagements

Nach ABELE ist eine der Kernaufgaben des Technologiemanagements die Bereitstellung von geeigneten Methoden und Vorgehensweisen [1]. Aus diesem Grund existiert ein breites Spektrum an Methoden, die exklusiv für das Technologiemanagement entwickelt oder aus anderen Themenbereichen adaptiert wurden. Durch die Querschnittsfunktion des Technologiemanagements und unterschiedliche Fragestellungen, die in den verschiedenen Phasen beantwortet werden müssen, ergibt sich ein breites Methodenportfolio, welches in diesem Abschnitt erläutert wird. Um die Methoden zu kategorisieren und vergleichbar zu machen, können verschiedene Kriterien herangezogen werden. Daher wird zu Beginn ein Überblick über relevante Kategorisierungsmerkmale gegeben. Im weiteren Verlauf des Abschnitts werden klassischen Methoden sowie ausgewählte Ansätze der Forschung vorgestellt, um die Grundlage für eine spätere Bewertung der Ansätze in Abschnitt 3.5 zu schaffen.

Grundsätzlich ist eine Unterscheidung zwischen *quantitativen* und *qualitativen* Methoden vorzunehmen. Quantitative Methoden zielen auf eine objektive Bewertung anhand von messbaren Bewertungsgrößen ab, um reproduzierbare Bewertungen technologischer Entwicklungen zu gewährleisten [204]. Qualitative Methoden hingegen greifen auf Expertenabschätzungen oder andere Informationsquellen zurück. Sie setzen im Vergleich zu quantitativen Ansätzen eine geringere Methodenkompetenz voraus und kommen vor allem in der Technologiefrüherkennung und Technologieplanung zum Einsatz [204], da dort kaum quantifizierbare Bewertungsgrößen vorliegen. Quantitative Methoden finden vornehmlich in den Phasen Technologieentwicklung, -verwertung und -schutz Anwendung, da zu diesem Zeitpunkt entsprechende Bewertungsgrößen vorliegen [60, 94]. VORBACH unterscheidet weiterhin zwischen Methoden für die *Grob- und Feinbetrachtung* von Technologien (vgl. Anhang A.11). Methoden der Grobbetrachtung filtern in frühen Phasen des Technologiemanagements das Spektrum an potenziellen Technologien, worauf aufbauend die Methoden der Feinbetrachtung eine kriterienspezifische Bewertung und Rangfolgebildung vornehmen [94, 195].

Der *Zeitpunkt des Methodeneinsatzes*, sowohl im Hinblick auf die Phasen des Technologiemanagements (vgl. Abschnitt 3.3) als auch auf die Phase des Technologielebenszyklus (vgl. Abschnitt 3.1.1), bildet ein weiteres Unterscheidungskriterium. Methoden, die in den frühen Phasen des Technologiemanagements bzw. des Technologielebenszyklus eingesetzt werden, zielen darauf ab, die Potenziale und Einsatzmöglichkeiten einer Technologie abzuschätzen, und sind aufgrund der begrenzten Informationsgrundlage von hoher Unsicherheit geprägt [60]. Methoden der späteren Phasen bedienen sich einer gefestigten Informationsgrundlage und besitzen entsprechend einen quantitativen Charakter.

Der in den Methoden *betrachtete Zeithorizont* stellt ein weiteres Klassifizierungsmerkmal dar. Nach WELLENSIEK kann zwischen kurz-, mittel- und langfristig orientierten Methoden unterschieden werden [204]. Methoden mit kurzfristiger Ausrichtung betrachten in der Regel einen Zeitraum von bis zu fünf Jahren und werden vornehmlich zur Früherkennung und operativen Technologieplanung eingesetzt [60]. Mittelfristig ausgerichtete Methoden besitzen hingegen einen Betrachtungszeitraum von etwa fünf bis zehn Jahren. Langfristige Methoden werden zu meist bei strategischen Fragestellungen eingesetzt und zielen auf einen Zeitraum von mehr als zehn Jahren ab [94].

#### 3.4.1 Klassische Methodenansätze

In Tabelle 3.2 ist eine Übersicht bestehender Methoden des Technologiemanagements dargestellt. Die Ansätze sind entsprechend den Ausführungen aus Abschnitt 3.4 nach ihrer Art, der betrachteten Phase, dem zeitlichen Horizont und der Betrachtungstiefe kategorisiert. Die in Abschnitt 2.4 beschriebene Zielstellung der Arbeit können in die strategische Technologieplanung eingeordnet werden. Dies begründet sich einerseits durch den langfristigen Planungshorizont, für den sichergestellt werden muss, dass die richtigen Technologieprojekte bearbeitet werden. Andererseits muss eine integrative Betrachtung von marktseitigen und technologischen Entwicklungen erfolgen, um diese zu synchronisieren und in operative Vorgaben zu überführen (vgl. Abschnitt 3.3.2). Aus diesem Grund erfolgt für den weiteren Verlauf der Arbeit eine Einschränkung auf Ansätze, deren Haupt- oder Nebenanwendungsbereich in der strategischen Technologieplanung liegt. Im Rahmen der Tabelle sind jedoch auch Ansätze weiterer Phasen bewertet, diese werden jedoch nicht explizit erläutert.

In der *Bibliometrie* werden mithilfe von Publikationsdatenbanken Informationen zu Veröffentlichungen gesammelt und durch mathematische Verfahren analysiert und verdichtet. Hierzu werden Suchfeldstrategien erarbeitet, die das Themenfeld umschreiben und die relevante Literatur identifizieren. Durch die Analyse der Metadaten identifizierter Veröffentlichung wie Autor, Veröffentlichungsjahr, Universität oder Unternehmen, lassen sich verschiedene Rückschlüsse ziehen. Zum einen können assoziierte Schlüsselbegriffe und Themenfelder identifiziert werden. Zum anderen können relevante Akteure in Form von Autoren und deren Verhältnis zu anderen Akteuren des Themenfelds beschrieben werden. Weiterhin lässt sich über die absolute Anzahl der Veröffentlichung auf die Aktivität innerhalb des Themenfelds schließen. Bei Veröffentlichungen zu Technologien lässt sich beispielsweise die Lebenszyklusphase der Technologie bestimmen. [53, 60, 209]

Das *Brainstorming* ist aufgrund seiner Vielseitigkeit und simplen Anwendungsform auch im Technologiemanagement eine häufig eingesetzte Methode. Die Grundlage des Brainstorming

**Tabelle 3.2:** Kategorisierung und Vergleich verschiedener Methoden des Technologiemanagements [94, 146, 151, 152, 159, 195, 204, 209]

Bezeichnung	Art		Phase						Zeit			Tiefe	
	qualitativ	quantitativ	Technologiefrüherkennung	strat. Technologieplanung	op. Technologieplanung	Technologieentwicklung	Technologieverwertung	Technologiebewertung	kurzfristig	mittelfristig	langfristig	Grobbetrachtung	Feinbetrachtung
Bibliometrie <sup>1</sup>		●	●	○				○		●			●
Brainstorming	●		○	●	●	○			●			●	
Break Even Analyse		●			●	○	●	●		●			●
Checklisten	●					●		●	●			●	
Delphi Methodik	●		●					○			●		●
Internetrecherche	●		●					○	●			●	
Kosten-Nutzen-Analyse		●			●	○	○	●		●			●
Lead User Analyse	●		●						●				●
Modell-Simulation		●		●	○			○			●		●
Morphologischer Kasten	●		○		●	●		○	●			●	
Nutzwertanalyse		●			○		○	●	●				●
Patentanalyse <sup>2</sup>		●	●	○				○		●			●
QFD <sup>3</sup>		●			○	○		●		●			●
S-Kurven-Analyse		●	●	○				○			●	●	
SWOT <sup>4</sup> -Analyse	●			●	○			●	●			●	
Szenariotechnik	●		●	○				○			●	●	
Technologieportfolio	●			●	○			●	●			●	
Technologieroadmapping	●			●	○					●			●
Trendextrapolation		●	●					○		●		●	
Wechselwirkungsanalyse	●		●	●	○			○		●		●	

● Hauptanwendungsbereich    ○ Nebenanwendungsbereich

<sup>1</sup> Bibliometrische Häufigkeits- und Verflechtungsanalysen

<sup>2</sup> Patenhäufigkeits- und Patentverflechtungsanalysen

<sup>3</sup> Quality Function Deployment

<sup>4</sup> Strengths Weaknesses Opportunities Threats

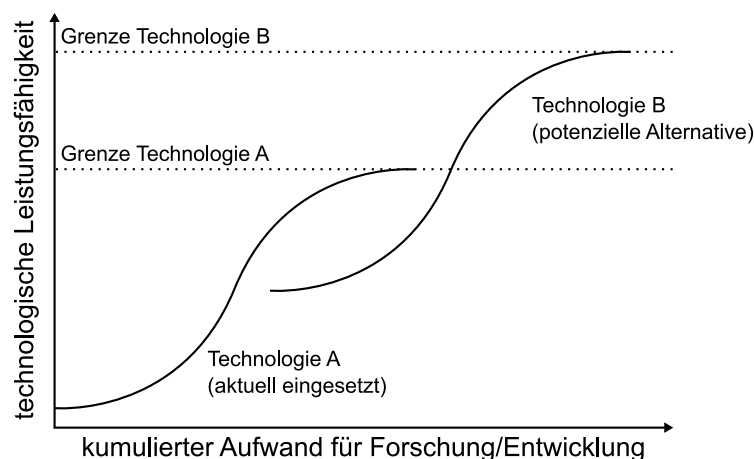
ist es, innerhalb einer Gruppe für eine definierte Fragestellung in einer kurzen Zeit möglichst viele Lösungsvorschläge zu erarbeiten und einen breiten Lösungsraum aufzuspannen. Durch die große Anzahl der Lösungsmöglichkeiten soll die Wahrscheinlichkeit der Lösungsfindung erhöht werden.[143]

Im Rahmen der *Modell-Simulation* wird versucht, das reale Verhalten und die Prozesse innerhalb eines Unternehmens und seiner Umwelt durch ein Modell abzubilden, um die Folgen von Entscheidungen abschätzen zu können. Beim Ansatz von System Dynamics, als exemplarischer Vertreter der Modell-Simulation, wird beispielsweise auf Grundlage einer Beschreibung des abzubildenden Systems ein Kausaldiagramm erstellt. Dieses Diagramm repräsentiert die dynamischen Zusammenhänge zwischen Systemzuständen und Transitionsprozessen. Das Kausaldiagramm wird ferner in ein quantitatives Flussdiagramm überführt, welches die Wirkbeziehungen und zeitlichen Abhängigkeiten in einem mathematischen Modell beschreibt. Anschließend werden die relevanten Handlungsalternativen mithilfe des Modells simuliert, um eine konkrete Folgenabschätzung zu ermöglichen. Anwendung finden solche Ansätze dort, wo unternehmensinterne Veränderungsprozesse, wie eine Umstellung des Produktportfolios, und unternehmensexterne Randbedingungen, wie Marktentwicklungen oder Gesetzgebungen, in engem Zusammenhang stehen. [156, 201]

Die *Patentanalyse* ist angelehnt an die Bibliometrie, fokussiert sich jedoch auf die Auswertung von Patentinformationen. Ähnlich wie bei der Bibliometrie wird zunächst das Suchfeld für die Patentrecherche definiert. Dies kann auf Basis von Schlüsselbegriffen, IPC-Patentklassen, Anmeldern oder anderen Metainformationen der Patente erfolgen. Die Ergebnisse der Patentrecherche werden im Anschluss, analog zur Bibliometrie, durch mathematische Verfahren analysiert und ins Verhältnis gesetzt. So können relevante Akteure (z. B. Unternehmen oder Erfinder), assoziierte Patentfelder und durch die Häufigkeitsverteilung der Patentanmeldungen auch die Lebenszyklusphase von Technologien bestimmt werden. Der Vorteil gegenüber der Bibliometrie liegt in der frühen Verfügbarkeit von Patentinformationen, woraus bereits frühzeitig Trends abgeleitet werden können. Ferner liegen die Metainformationen in standardisierten Formaten vor und können somit gut durch Algorithmen verarbeitet werden. [53]

Mit der von FOSTER entwickelten Methode der *S-Kurven-Analyse* können die Potenziale und Grenzen einer Technologieentwicklung abgeschätzt werden. Die Methode baut auf dem Lebenszyklusmodell nach LITTLE auf, wonach jede Technologie im Laufe ihres Lebens die Phasen Entstehung, Wachstum, Reife und Alter durchläuft (vgl. Tabelle A.2). In einem Diagramm werden die kumulierten Aufwendungen für Forschung und Entwicklung auf der Abszisse einem Leistungsmaß der Technologie auf der Ordinate gegenübergestellt. Anhand dieser Kennwerte kann ein S-Kurven-Diagramm aufgetragen werden und aus dem Verlauf der Kurve die noch vorhandenen Potenziale und die maximale Leistungsgrenze der Technologie bestimmt werden. Durch einen Vergleich mit Alternativtechnologien im gleichen Diagramm lässt sich ferner der Zeitpunkt für einen Technologiewechsel bestimmen.

In Abbildung 3.8 ist exemplarisch der Aufbau einer S-Kurven-Analyse gezeigt. In der Darstellung sind die Entwicklungsverläufe für zwei alternative Technologien abgebildet und das jeweilige maximale technologische Leistungsniveau gekennzeichnet. Erkennbar ist, dass Technologie B eine höhere maximale Leistungsfähigkeit als die aktuell eingesetzte Technologie A besitzt und zukünftig ein Technologiewechsel sinnvoll ist. [16, 60, 162]



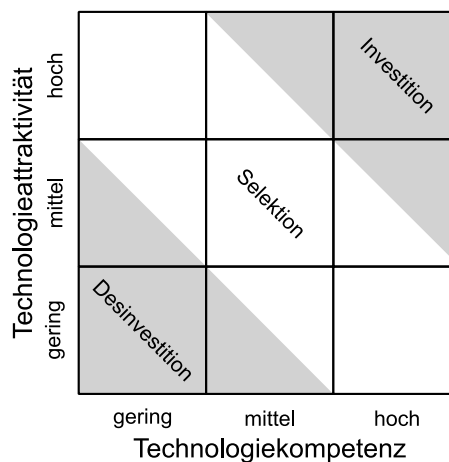
**Abbildung 3.8:** Aufbau einer S-Kurven-Analyse [162]

Unter der *SWOT-Analyse* wird die systematische Bewertung von Stärken, Schwächen, Chancen und Bedrohungen im Unternehmenskontext verstanden. Hierbei stellen die Stärken und Schwächen unternehmensinterne Faktoren dar. Unternehmensexterne Chancen und Bedrohungen wirken von der Umwelt auf das Unternehmen ein und müssen entsprechend den Stärken und Schwächen adressiert werden. In einem Portfolio werden die Stärken und Schwächen den Chancen und Bedrohungen gegenübergestellt. Ziel der SWOT-Analyse ist die Bildung einer Technologiestrategie, in der Stärken und Chancen zur Kompensation von Schwächen und Bedrohungen genutzt werden, um den langfristigen Unternehmenserfolg zu sichern. [144]

Die *Szenariotechnik* verfolgt das Ziel, alternative Bilder möglicher Zukünfte für unternehmensrelevante Bereiche zu entwickeln und die entsprechenden Folgen für das Unternehmen abzuleiten. In einem mehrstufigen Verfahren werden zunächst die Problemstellung analysiert, die relevanten Einflussfaktoren des Szenarios identifiziert und Annahmen für zukünftige Entwicklungen dieser Faktoren getroffen. Im Anschluss werden konsistente Kombinationen von Annahmen gebildet und die entsprechenden Szenarien detailliert. Hierbei wird in vielen Fällen ein positives und negatives Extremszenario sowie ein neutrales Trendszenario beschrieben. Den Abschluss der Methode bildet die Beschreibung der Auswirkungen für das Unternehmen und die Ableitung von Maßnahmen zur Kompensation von negativen Auswirkungen oder Nutzung entstehender Potenziale. [56, 106]

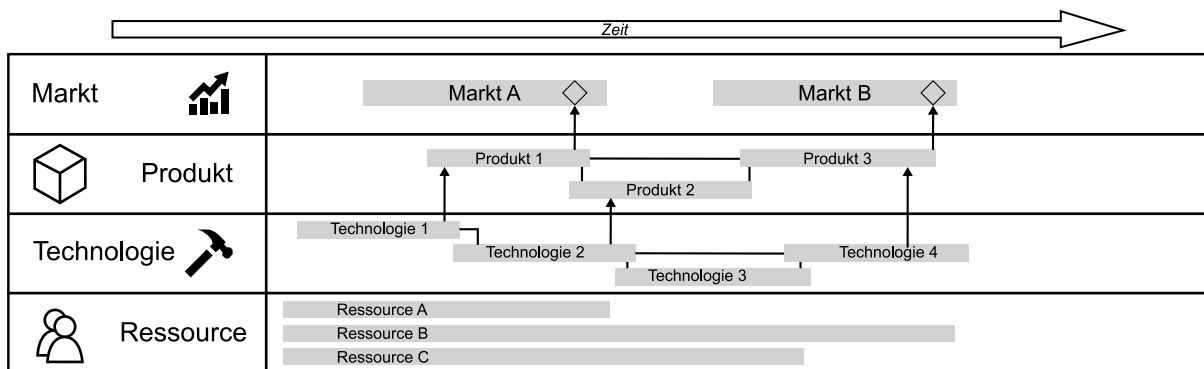
Mit der von PFEIFFER [122] entwickelten Methode des *Technologieportfolios* wird die Technologiekompetenz des Unternehmens ins Verhältnis zur Technologieattraktivität gesetzt. Die Technologiekompetenz als unternehmensinternes Kriterium drückt die relative Stärke des Unternehmens in einer Technologie im Verhältnis zu den Wettbewerbern aus. Mit dem unternehmensexternen Kriterium der Technologieattraktivität wird die marktseitige Nachfrage nach einer Technologie abgebildet. In der durch diese zwei Größen aufgespannte Matrix werden die Technologien des Unternehmens eingeordnet. Entsprechend ihrer Position im Portfolio lassen sich geeignete Technologiestrategien ableiten. Bei hoher Attraktivität und hoher Kompetenz empfiehlt sich eine Investition, wohingegen bei geringer Attraktivität und Kompetenz eine defensive Strategie vorzuziehen ist. Im Zwischenbereich muss eine Selektion stattfinden. In Abbildung 3.9 sind der Portfolioansatz und die empfohlenen Strategien der Sektoren aufgezeigt. [1, 19, 62, 72, 122]





**Abbildung 3.9:** Strategien innerhalb eines Technologieportfolios [162]

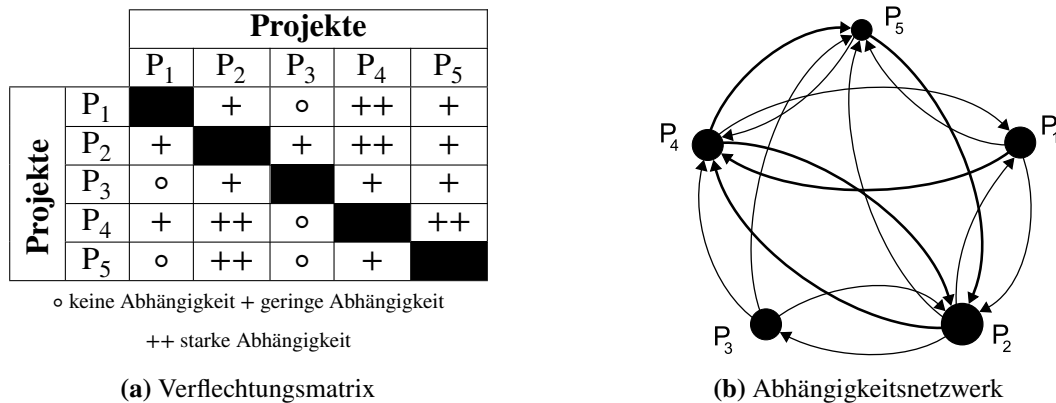
Das *Technologieroadmapping* adressiert die strategische Technologieplanung und hat zum Ziel, Anforderungen aus dem Markt mit konkreten Technologieprojekten zu verknüpfen und eine Ressourcenallokation vorzunehmen. Die Methode baut auf dem in der Luftfahrtindustrie entwickelten Technologiekalender auf [161]. Hierbei werden in einem mehrstufigen Workshopprozess aus existierenden Marktanforderungen und geplanten Markteinstiegen relevante Produkte abgeleitet und potenzielle Einsatzzeitpunkte für den Markteintritt definiert. Diesen Produkten werden im Anschluss konkrete Technologien zugeordnet und die entsprechenden Ressourcen für die angedachte Technologieentwicklung verknüpft. In Abbildung 3.10 ist eine beispielhafte Technologieroadmap mit den unterschiedlichen Ebenen dargestellt und die Verknüpfung der einzelnen Ebenen verdeutlicht.



**Abbildung 3.10:** Exemplarischer Aufbau einer Technologieroadmap

Über die Zeitachse aufgetragen ergibt sich eine Roadmap über die Ebenen Markt, Produkt, Technologie und Ressourcen, in der die Handlungsstränge aufeinander abgestimmt und verknüpft sind. Somit können auch Produkt- und Prozessinnovationen aufeinander abgestimmt werden (vgl. Abschnitt 3.1). Das primäre Ziel von Technologieroadmaps bildet die Identifizierung und Darstellung technologiebezogener Projekte, die zur Entwicklung zukünftiger Kompetenzen grundlegend sind und die Wettbewerbsposition entsprechend der festgelegten Strategie stärken.[1, 23, 43, 89, 124]

Mit der *Wechselwirkungsanalyse* wird versucht, Abhängigkeiten zwischen Handlungssträngen abzubilden, indem wechselseitige Abhängigkeiten zwischen Ereignissen aufgezeigt werden. Dies ist sowohl auf unternehmensinterne Technologieprojekte als auch auf die Analyse unternehmensexterner Randbedingungen anwendbar. Die Wechselwirkungsanalyse wird meist in Form einer Verflechtungsmatrix durchgeführt, in der potenzielle Ereignisse oder Projekte über die Zeilen und Spalten der Matrix aufgetragen werden und anschließend innerhalb der Matrix die Abhängigkeit der Ereignisse oder Projekte zueinander bewertet wird.



**Abbildung 3.11:** Exemplarischer Aufbau einer Wechselwirkungsanalyse

Durch die Bestimmung von Spalten- und Zeilensummen der Matrix kann auf die Relevanz der entsprechenden Ereignisse geschlossen werden und zwischen dominanten und abhängigen Ereignissen oder Projekten unterschieden werden. Die Bewertung der Abhängigkeit kann unter verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen. Typischerweise wird zwischen zeitlichen, technologischen und monetären Abhängigkeiten unterschieden. In Abbildung 3.11 ist eine Verflechtungsmatrix für fünf beispielhafte Projekte und das hieraus resultierende Abhängigkeitsnetzwerk dargestellt. Die Pfeile repräsentieren die Richtung der Abhängigkeit, durch die Linienbreite wird die Stärke der Abhängigkeit ausgedrückt. Ziel der Wechselwirkungsanalyse ist es, dominante Projekte oder Ereignisse zu identifizieren, um eine Priorisierung innerhalb des Projektportfolios vorzunehmen und das Risiko eines Scheiterns zu minimieren. [62, 72, 157]

### 3.4.2 Ausgewählte Forschungsansätze

Nachdem die klassischen Methoden der strategischen Technologieplanung erläutert sind, wird in diesem Abschnitt auf ausgewählte Forschungsaktivitäten zur Adressierung bestehender Problemstellungen innerhalb des Technologiemanagements eingegangen. In Anlehnung an die Zielsetzung dieser Arbeit findet auch hier eine Fokussierung auf Ansätze statt, die auf die strategische Technologieplanung abzielen. Die Beschreibung bildet die Grundlage für eine spätere Bewertung der Lösungsansätze in Bezug auf die in Abschnitt 2.4 definierten Anforderungen an einen Methodenansatz.

In einem von MÖHRLE et al. (1994) vorgestellten Ansatz wird die Projektportfoliomethode um eine Wechselwirkungsanalyse erweitert. In dieser Erweiterung werden die Abhängigkeiten zwischen Projekten in den Dimensionen Ergebnis, Nutzen und Ressourcen abgebildet. Durch die Bündelung von Projekten besonders starker Abhängigkeiten ergeben sich Möglichkeiten, das

Projektportfolio neu zu bewerten und die Verwobenheit der Projekte auf den Portfolioansatz abzubilden. Ziel der Methode ist es, die bestehenden Projekte unter Berücksichtigung interner Abhängigkeiten in Bezug auf den externen Marktsog (Market-Pull) und internen Technologiedruck (Technology-Push) zu bewerten und Handlungsempfehlungen für die strategische Ausrichtung der Projekte geben zu können. [108]

ABELE (2006) zeigt, ausgehend von den aktuellen Methoden Technologieportfolio, Technologieroadmapping und Projektreifegradmethode, einen Ansatz für das strategische Technologiemanagement. Der Fokus liegt insbesondere auf der Planung und dem Management von Kooperationen. Auf Basis eines erstellten Technologieportfolios werden relevante Technologien identifiziert und eine entsprechende Technologieroadmap erstellt, welche mithilfe der Projektreifegradmethode operationalisiert wird (Strategieimplementierung und Umsetzung). Die Bewertung der Technologieprojekte erfolgt mithilfe einer Nutzwertanalyse. Durch die erarbeitete Technologieroadmap wird weiterhin die Identifikation von potenziellen Kooperationspartnern unterstützt, die das vorhandene Technologieportfolio zielgerichtet ergänzen sollen. [1]

Der Ansatz von HEESSEN (2009) zeigt auf, wie positive und negative Abhängigkeiten in die Bewertung von Projektportfolios einbezogen werden können. Der vorgestellte Ansatz erweitert die klassische Wechselwirkungsanalyse (vgl. Abschnitt 3.4.1) um die Möglichkeit zur quantitativen Darstellung positiver und negativer Auswirkungen innerhalb eines Projektportfolios, um Auswirkungen eines Misserfolgs von Teilprojekten abbilden zu können. Hierzu wird die Methode des analytischen Hierarchieprozesses (AHP) [140] aus der Entscheidungsunterstützung adaptiert, um technische, wirtschaftliche und ressourcenbezogene Abhängigkeiten zwischen Innovationsprojekten abbilden und bewerten zu können. Gleichzeitig wird durch die Verwendung des AHP eine Konsistenzprüfung in der Bewertung ermöglicht. Die entwickelte Methode wird in ein Gesamtkonzept zur Projektpriorisierung in frühen Phasen von Innovationen eingebettet. [62]

LEE et al. (2009) kombinieren eine semantische Patentanalyse mit der Methodik des Technologieroadmapping. Hierbei wird ein inverser Ansatz verfolgt, der ausgehend von einer unternehmensintern entwickelten Technologie die möglichen Konkurrenztechnologien und Einsatzmärkte durch die semantische Patentanalyse identifiziert und ggf. komplementäre Technologien ableitet. Aufbauend auf diesen Ergebnissen werden eine Positionierung der Technologie am Markt unter Einsatz einer Technologieroadmap vorgenommen und die benötigten Ressourcen abgeleitet. [91]

In einem von JÜHLING (2011) vorgestellten Ansatz zum Technologiemanagement im After Sales Service wird ein vierstufiges Verfahren zum systematischen Technologieroadmapping verfolgt. Ziel des Ansatzes ist es, die Entwicklung von Fahrzeug- und Werkstatttechnologien zu synchronisieren. In einer Vorphase werden zunächst relevante Stakeholder identifiziert und ein grundsätzliches Vorgehen definiert. Die darauf folgende Informationsphase bricht die Unternehmensziele auf After Sales spezifische Anforderungen herunter und identifiziert durch eine Expertenbefragung relevante Fahrzeugtechnologien. Während der Erstellungsphase wird eine sogenannte *First-Cut-Roadmap* erstellt, in der die aktuellen Werkstatttechnologien mit den Fahrzeugtechnologien abgeglichen werden. Diese Roadmap stellt die Grundlage für eine anschließende Gap-Analyse dar, die Defizite in der aktuellen Roadmap identifiziert und Aufschluss über den zukünftigen Technologieentwicklungsbedarf gibt. Aus der Kombination der First-Cut-Roadmap und der Gap-Analyse wird abschließend eine finale Roadmap definiert und im Rahmen der Implementierungsphase ein konkreter Umsetzungsplan abgeleitet. Den Abschluss

des Vorgehens bildet eine Review-Phase, in der Verbesserungspotenziale ermittelt werden und eine Erfolgskontrolle durchgeführt wird.[74]

In der Arbeit von NAU (2012) erfolgt eine Anpassung der Technologieplanung auf den Anlauf von neuen Technologien in Produktionssystemen. Im Fokus steht die Optimierung des Anlaufverhaltens durch gezielte Bewertung von potenziellen Fertigungstechnologien und die Erarbeitung von alternativen Technologieketten. Hierzu wird zunächst die Ausgangssituation analysiert und in der Grobplanung die Technologiealternativen durch eine Risiko-Potenzial-Analyse reduziert. In der Feinplanung wird im Anschluss das Hochlaufverhalten des Produktionssystems in Abhängigkeit der Fertigungstechnologien untersucht. Auf die Generierung der Technologiekette, also die Kombination der Einzeltechnologien, wird kein Einfluss genommen. [111]

ZOPP (2013) verfolgt in seiner Arbeit das Ziel, auf Basis vergangener Technologieentwicklungen und aktueller technischer Systeme eine Projektion der Entwicklung in die Zukunft zu ermöglichen. Hierzu wird ein evolutionsbasiertes Verfahren entwickelt, das auf Grundlage der TRIZ-Methode vergangene Entwicklungen analysiert und mit der aus der Evolutionsbiologie stammenden Kladistik in eine Technologievorausschau überführt. Den Abschluss der Methodik bildet eine integrierte Lebenszyklus-Nachhaltigkeitsbewertung der Ergebnisse. [209]

Der Ansatz von SPANGENBERG (2014) verfolgt die Kombination des strategischen Technologiemanagements mit einer Monte-Carlo-Simulation zur Performanceabschätzung von komplexen technischen Systemen. Hierzu wird das zu bewertende technische System in ein Modell und das System in seine Komponenten überführt. Weiterhin werden die leistungstechnischen Zusammenhänge der Komponenten abgebildet und die mathematischen Zusammenhänge für die Bewertungsparameter Technologiereife, Emissionsfaktor und Gesamtkosten beschrieben. Im Anschluss werden auf Basis von Experteninterviews die zukünftigen Entwicklungen für die Leistungsparameter der einzelnen Komponenten des Gesamtsystems prognostiziert. Diese potenziellen Leistungsparameter stellen die Eingangsgröße für eine Monte-Carlo-Simulation dar, auf deren Basis die Performance des Gesamtsystems modellbasiert abgeschätzt und der Einsatzzeitpunkt der Einzeltechnologien bestimmt wird. Anschließend erfolgt eine rückwärts orientierte Terminierung der Entwicklungsstränge auf Grundlage der theoretischen Einsatzbereitschaft. [159]

SCHINDLER (2015) entwickelt einen Ansatz zur ganzheitlichen Planung für Technologieketten unter Berücksichtigung von geplanten Bauteilfeatures. Hierzu wird das Produkt in seine Komponenten zerlegt und die einzelnen Features werden definiert. Aufbauend auf den zu produzierenden Bauteilfeatures werden die Prozessschritte zur Herstellung durch eine Substantiv-Verb-Kombination beschrieben. Den einzelnen Prozessschritten werden im Anschluss potenziell geeignete Prozesstechnologien zugeordnet. Die Technologien werden von Experten auf Steckbriefen charakterisiert. Unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Bauteilfeatures werden anschließend durch Kombination von Einzeltechnologien die realisierbaren Technologieketten aufgestellt. Abschließend werden die Technologieketten unter den Aspekten Technologiereife, Technologiepotenzial und Wirtschaftlichkeit mit einer Monte-Carlo-Simulation bewertet. [146]

Um den strategischen Aufbau von Kompetenzen zu unterstützen, stellt RÜBBELKE (2016) eine Methodik vor, mit der zunächst die aktuelle Ausgangslage des Unternehmens auf Grundlage von Technologiestrategie und Technologieportfolio beschrieben wird. Aufbauend hierauf werden zukunftsrelevante Technologien mit einem morphologischen Kasten aus den Innovationsvorhaben

abgeleitet und durch einen Abgleich mit den vorhandenen Kompetenzen entsprechende Handlungsempfehlungen definiert. Hierbei erfolgt auch eine Bewertung im Hinblick auf Erreichbarkeit und strategischer Bedeutung durch eine Wechselwirkungsanalyse. Den letzten Arbeitsschritt bildet die Konkretisierung der Kompetenzaufbauprogramme in Form einer Roadmap. [139]

Der Ansatz von LEE et al. (2017) kombiniert das Technologieroadmapping mit einer Wechselwirkungsanalyse, um die Entwicklungstendenzen des Markts abschätzen zu können und so das unternehmensinterne Technologieportfolio aktiv zu beeinflussen. Hierzu werden verschiedene Parameter des Markts untersucht und ein zukünftiges Szenario der Marktentwicklung aufgestellt. Anschließend wird die unternehmensinterne Technologieentwicklung als beeinflussbare Kenngröße durch den AHP bewertet. [90]

Neben den in diesem Kapitel aufgeführten Ansätzen existieren in der wissenschaftlichen Literatur noch weitere Arbeiten zur Bewertung und Planung von Technologien im weiteren Sinne, die jedoch nicht in den Untersuchungsrahmen dieser Arbeit fallen, da sie der operativen Technologieplanung zuzuschreiben sind.

### 3.5 Bewertung bestehender Ansätze

Nachdem die für diese Arbeit relevanten Methoden des Technologiemanagements vorgestellt sind, gilt es, die existierenden Ansätze mit den in Abschnitt 2.4 definierten Anforderungen an einen Methodenansatz gegenüberzustellen. Dies ermöglicht im weiteren Verlauf die Ableitung einer konkretisierten Zielstellung für die nachgelagerte Methodenentwicklung. Neben den zuvor ausgeführten speziellen Anforderungen durch das Themenfeld ASR werden auch allgemeingültige Anforderungen an die Methodenansätze der strategischen Technologieplanung gestellt. Diese sind in Anhang A.12 dargestellt. An dieser Stelle sollen diese Anforderungen nicht mit in die Bewertung einbezogen werden, da die existierenden Methoden diese bereits erfüllen. Sie dienen jedoch als Grundlage für die spätere Methodenkonzeption in Kapitel 5. Da die Problemstellung dieser Arbeit der strategischen Technologieplanung zuzuordnen ist, werden in der Bewertung ausschließlich Methoden betrachtet, die für den Einsatz in dieser Phase des Technologiemanagements geeignet sind (vgl. Abschnitt 3.4.1). Die in Abschnitt 3.4.2 ausgeführten Ansätze der Forschung werden vollumfänglich in die Bewertung einbezogen.

#### 3.5.1 Bewertung klassischer Methodenansätze

In Tabelle 3.3 ist eine Übersicht über die klassischen Methoden des Technologiemanagements in Gegenüberstellung mit den in Abschnitt 2.4.1 beschriebenen Anforderungen an einen Methodenansatz für das strategische Technologiemanagement in komplexen dynamischen Bereichen dargestellt. Erkennbar ist, dass die vorhandenen Methoden die gesetzten Anforderungen nur teilweise erfüllen.

Die *Bibliometrie* ist durch ihre Ausrichtung auf die Erkennung von Technologietrends nur bedingt als Planungswerkzeug, insbesondere für Markt-Pull-Ansätze, einsetzbar. Ebenso findet während der Literaturrecherche nur eine quantitative Bewertung und keine qualitative Auswertung der Ergebnisse statt. Somit ist eine Berücksichtigung der Technologiereife in den Suchergebnissen

**Tabelle 3.3:** Bewertung klassischer Methodenansätze vor dem Hintergrund des Spannungsfelds ASR

Bezeichnung	Priorisierung von Technologieprojekten	Technology-Push-Ansätze	Market-Pull-Ansätze	Kombination der Ansätze	Berücksichtigung von Dynamik	Berücksichtigung von Technologiereife	Ermittlung komplexer Abhängigkeiten
Bibliometrie	●	●			●		●
Brainstorming		●				●	
Modell-Simulation		●	●	●	●		●
Patentanalyse	●	●			●		●
S-Kurven-Analyse	●	●				●	
SWOT-Analyse	●	●	●	●			
Szenariotechnik	●		●		●		●
Technologieportfolio	●	●				●	●
Technologieroadmapping	●	●	●	●		●	
Wechselwirkungsanalyse	●	●	●		●		●

● gut geeignet    ● bedingt geeignet

nicht möglich. Das Verfahren der manuell definierten Suchfeldstrategie ermöglicht zudem nur eine eingeschränkte Berücksichtigung von dynamischen Entwicklungen der Technologiefelder und die Identifikation von Abhängigkeiten beschränkt sich auf die Analyse der Metadaten wie Autor, Veröffentlichungsdatum oder Institution. [53, 60, 209]

Im *Brainstorming* steht die gruppendynamische Generierung von alternativen Lösungsvorschlägen im Vordergrund. Eine Priorisierung ist nicht vorgesehen und durch das intuitive Vorgehen ist auch die Identifikation komplexer Abhängigkeit nur schwer möglich. Eine Berücksichtigung von dynamischen Entwicklungen ist nur durch eine stetige Wiederholung des Brainstormings möglich und mit einem hohen Mehraufwand verbunden. [143]

Mit der *Modell-Simulation* ist zwar die dynamische Abbildung von Abhängigkeiten möglich, jedoch müssen diese im Vorfeld bekannt sein, um modelliert werden zu können. Eine Berücksichtigung unterschiedlicher Technologiereifen findet in der Modell-Simulation ebenfalls nicht statt. Deshalb ist eine Anwendung auf die Priorisierung von Technologieprojekten nur eingeschränkt möglich und es müssen angepasste Modelle gebildet werden, um eine Aussage über die strategische Ausrichtung von Technologieprojekten zu ermöglichen. Eine Betrachtung von Technology-Push- oder Market-Pull-Ansätzen findet in der Modell-Simulation getrennt voneinander statt. Eine integrative Betrachtung erfordert die Erstellung komplexer Relationsmodelle und ist nur eingeschränkt möglich. [156, 201]

Die *Patentanalyse* ist in ihrem Aufbau an die Methodik der Bibliometrie angelehnt und weist entsprechend ähnliche Eigenschaften auf. In der Analyse der Patentschriften findet keine Berück-

sichtigung des Technologiereifegrads statt und die Abhängigkeitsanalyse erfolgt auf Grundlage der Metadaten. Die thematischen Inhalte der Patentschrift werden nur eingeschränkt berücksichtigt. Ebenso ist die Umsetzung von Market-Pull-Ansätzen nicht möglich, da Patentanmeldungen als frühe Signale technologischer Entwicklungen lediglich die Stoßrichtung der unternehmerischen Forschung und Entwicklung repräsentieren. [53]

Mit der *S-Kurven-Analyse* erfolgt eine Betrachtung einzelner Technologien im Kontext einer Potenzialabschätzung. Somit wird ein reiner Technology-Push-Ansatz verfolgt. Die Reife der Technologie wird nur indirekt über den Leistungsparameter berücksichtigt. Eine Berücksichtigung dynamischer Entwicklungen und auch die Identifikation von Abhängigkeiten zu anderen Technologien sind nicht Bestandteil der Methode. Eine Priorisierung von Technologieprojekten ist nur eingeschränkt möglich. Es wird lediglich der zeitliche Übergang von einer Technologie zu einer Nachfolgetechnologie unterstützt. [60, 162]

Analog zum Brainstorming besitzt die *SWOT-Analyse* einen statischen Charakter und die Ermittlung komplexer Abhängigkeiten ist durch den qualitativen Charakter der Methode (vgl. Tabelle 3.2) nicht umsetzbar. Bei der Erstellung der Matrix wird zudem keine Unterscheidung in den Technologiereifegraden vorgenommen. Da die SWOT-Analyse auf eine Grobbewertung innerhalb des Technologiemanagements abzielt, beschränkt sich ihre Einsetzbarkeit auf Fragestellungen in Bezug auf die Technologiestrategie. [60, 144]

Im Fokus der *Szenariotechnik* steht die Identifikation von potenziell negativen Einflüssen auf das Unternehmen, um geeignete Maßnahmen zur Kompensation zu entwickeln. Dementsprechend wird ein reiner Market-Pull-Ansatz verfolgt, Einsatzpotenziale neuer Technologien werden nicht berücksichtigt. Auf Grundlage der Ergebnisse der Szenariotechnik kann eine Priorisierung von Technologieprojekten im Kontext externer Einflüsse vorgenommen werden, hierbei erfolgt keine Berücksichtigung unternehmensinterner Einflüsse. Bedingt durch den aufwendigen Erstellungsprozess der Szenarien ist die Berücksichtigung von dynamischen Entwicklungen nur eingeschränkt möglich. Der Einfluss unterschiedlicher Technologiereifegrade auf die Bewertung ist ebenfalls nicht vorgesehen. [56, 106]

Das *Technologieportfolio* ist den statischen Methoden zuzuordnen und bietet nur eingeschränkt die Möglichkeit, komplexe Abhängigkeiten erkennbar zu machen. Darüber hinaus ist durch die Orientierung auf die Ausnutzung interner Technologiepotenziale die Umsetzung von Market-Pull-Ansätzen nicht vorgesehen. [1, 19, 62, 72, 122]

Das *Technologieroadmapping* wird in der strategischen Technologieplanung als eine der potentesten Methoden zur Verknüpfung von Marktbedarfen und Technologieentwicklungen gesehen, was auch die vielfache Verwendung als methodische Ausgangsbasis für eine Weiterentwicklung innerhalb der in Abschnitt 3.4.2 beschriebenen Forschungsaktivitäten verdeutlicht. Durch das workshopbasierte Verfahren ist zum einen die Berücksichtigung von Dynamik und zum anderen die Ermittlung von komplexen Abhängigkeiten nicht Zielsetzung der Methode. [1, 23, 43, 89, 124]

Die *Wechselwirkungsanalyse* als Werkzeug für die strategische Technologieplanung ist durch den qualitativen Charakter nicht in der Lage, unterschiedliche Technologiereifen zu berücksichtigen und entsprechend eine Priorisierung von Technologieprojekten vorzunehmen. Auch ist sie vornehmlich auf die Umsetzung von Technology-Push-Ansätzen ausgerichtet, wenngleich in einer getrennten Wechselwirkungsanalyse eine Betrachtung der Marktentwicklungen möglich ist. Eine Kombination beider Ansätze ist nicht vorgesehen. [62, 72, 157]

### 3.5.2 Bewertung ausgewählter Forschungsansätze

In Tabelle 3.4 ist eine Übersicht über die zuvor beschriebenen Forschungsaktivitäten dargestellt. Die Ansätze werden den Anforderungen an einen Methodenansatz gegenübergestellt (vgl. Abschnitt 2.4.1) und im Hinblick auf ihren Erfüllungsgrad bewertet.

**Tabelle 3.4:** Bewertung ausgewählter Forschungsaktivitäten vor dem Hintergrund des Spannungsfelds ASR

Autor (Jahr)	Priorisierung von Technologieprojekten	Technology-Push-Ansätze	Market-Pull-Ansätze	Kombination der Ansätze	Berücksichtigung von Dynamik	Berücksichtigung von Technologiereife	Ermittlung komplexer Abhängigkeiten
Möhrle et al. (1994)	●	●	●	●			●
Abele (2006)	●	●	●	●			●
Heesen (2009)	●	●					●
Lee et al. (2009)	●		●		●		●
Jühling (2011)		●	●	●	●		●
Nau (2012)			●			●	●
Zopp (2013)	●	●				●	
Spangenberg (2014)	●	●			●	●	●
Schindler (2015)			●		●	●	
Rübbelke (2016)	●	●	●				●
Lee et al. (2017)	●		●		●	●	●

● gut geeignet    ● bedingt geeignet

Der von MÖHRLE et al. (1994) vorgestellte Ansatz kombiniert die Wechselwirkungsanalyse mit der Projektportfoliomethode. So wird eine integrative Betrachtung von Technology-Push- und Market-Pull-Ansätzen und die Berücksichtigung von komplexen Abhängigkeiten ermöglicht. Der Portfolioansatz limitiert die Bewertung jedoch auf qualitative Kenngrößen. Ferner ist ausschließlich die Bewertung von Projektbündeln mit starken internen Abhängigkeiten möglich, eine Einzelbewertung konkreter Projekte im Hinblick auf das Gesamtportfolio erfolgt nicht. Auch dynamische Änderungsprozesse und technologische Reifegrade fließen nicht in die Projektpriorisierung ein. [108]

Der Ansatz von ABELE (2006) adressiert die strategische Technologieplanung mit Fokus auf das Management von Kooperationen. Hierbei findet nur eine eingeschränkte und indirekte Bewertung der Technologiereife durch die Projektreifegradmethode statt. Zudem besitzt die Methode durch ihre Fokussierung auf statische Ansätze, wie das Technologieportfolio, nicht die Möglichkeit, dynamische Entwicklungen zu berücksichtigen. Komplexe Abhängigkeiten zwischen



Technologie- und Entwicklungsprojekten fließen ebenfalls nur eingeschränkt im Rahmen der Roadmaperstellung in den Methodenansatz ein. [1]

Die von HEESEN (2009) entwickelte Methodik ermöglicht zwar die Priorisierung von Technologieprojekten aufgrund der abgebildeten Abhängigkeiten, jedoch bietet der entwickelte Ansatz keine Möglichkeit zur systematischen Identifikation dieser Abhängigkeiten. Ebenso ist die Abbildung von dynamischen Entwicklungen innerhalb des Projektportfolios nur eingeschränkt möglich. Eine Berücksichtigung unterschiedlicher Reifegrade innerhalb des Projektportfolios findet ebenfalls nicht statt. Da in der Bewertung auf bestehende Projektportfolios zurückgegriffen wird, besteht keine Möglichkeit zur Abbildung von Market-Pull-Ansätzen. [62]

Mit der Methode von LEE et al. (2009) wird die Positionierung am Markt aufgrund eines bestehenden Technologieportfolios ermöglicht und ausschließlich eine Market-Pull-Strategie verfolgt. Während der semantischen Patentanalyse erfolgt keine Berücksichtigung der Technologiereife identifizierter Konkurrenztechnologien. Eine Priorisierung ist zudem nur eingeschränkt möglich, da die Methode keine Möglichkeit zur Planung neuer Technologieentwicklungsprojekte bietet. [91]

In dem von JÜHLING (2011) vorgestellten Ansatz wird ein systematisches Vorgehen beschrieben, in dem die Entwicklung von Werkstatt- mit Fahrzeugtechnologien synchronisiert wird. Jedoch liegt der Fokus hierbei auf einem Market-Pull-Ansatz, da lediglich fahrzeugseitige Bedarfe in das Roadmapping einfließen. Zudem ist die Abbildung dynamischer Entwicklungen nur eingeschränkt möglich. Im Rahmen der Review Phase erfolgt zwar eine bedarfsgesteuerte Überarbeitung der Roadmap, für die Integration neuer Fahrzeug- oder Werkstatttechnologien muss der Ansatz jedoch erneut vollständig durchlaufen werden. Die Ermittlung komplexer Abhängigkeiten innerhalb des Themenfelds ist nicht integraler Bestandteil des Ansatzes und erfolgt in einzelnen Abschnitten auf Grundlage vorhandener Datenbanken. Ferner bietet der Ansatz keine Möglichkeiten zur Priorisierung der Technologieprojekte oder zur Berücksichtigung von unterschiedlichen Technologiereifegraden.[74]

NAU (2012) verfolgt in seinem Ansatz keine Projektpriorisierung, da die vorhandenen Technologien als gegeben angesehen werden und lediglich ihre Einsetzbarkeit in Bezug auf die aktuell zu realisierende Planungsaufgabe bewertet wird. Somit wird nur die Verfolgung einer reinen Market-Pull-Strategie, in der konkrete Problemstellungen durch ein vorhandenes Technologieportfolio adressiert werden, unterstützt. Eine Berücksichtigung von dynamischen Entwicklungen der Technologien und Abhängigkeiten zwischen den Technologieentwicklungsprojekten findet nicht statt, da diese als statische Eingangsgröße gesehen werden. [111]

Über den Ansatz von ZOPP (2013) wird das Technologiemanagement durch einen evolutionsbasierten Ansatz erweitert. Dies ermöglicht allerdings nur die Verfolgung einer Technology-Push-Strategie auf Basis der prognostizierten Technologieentwicklungen. Die Technologiereife der betrachteten Technologien fließt eingeschränkt in Form des Technologiepotenzials in die Bewertung ein. Die Betrachtung von Dynamik und Abhängigkeiten zwischen den Einzelprojekten und Entwicklungsaktivitäten wird im vorgestellten Ansatz ebenfalls nicht verfolgt. [209]

Der von SPANGENBERG (2014) vorgestellte Ansatz prognostiziert die potenzielle Performance komplexer technischer Systeme unter Zuhilfenahme einer Monte-Carlo-Simulation. Entsprechend werden Market-Pull-Ansätze ausgeschlossen. Durch die auf Experteninterviews beruhende Bewertung und Prognose der Technologiealternativen lassen sich dynamische Entwicklungen der

Technologien nur durch eine Wiederholung der Interviews und einem hiermit verbundenen Mehraufwand in die Methode integrieren. Abhängigkeiten werden in der Product-Structure-Matrix des Ansatzes zwar identifiziert, beschränken sich aber auf funktionale Abhängigkeiten innerhalb des Systemmodells. [159]

SCHINDLER (2015) verfolgt in seinem Ansatz eine vom zu produzierenden Bauteil rückwärts gewandte Strategie zur Planung von Technologieketten ähnlich zu NAU. Hierbei wird ebenfalls nur der Market-Pull-Ansatz verfolgt und keine strategieorientierte Priorisierung von Technologieprojekten ermöglicht. Die Berücksichtigung von Wechselwirkungen beschränkt sich auf Abhängigkeiten innerhalb der bewerteten Technologieketten. Die Abhängigkeit der Technologieentwicklungsaktivitäten werden nicht betrachtet. [146]

In dem von RÜBBELKE (2016) gewählten Ansatz werden zwar Market-Pull-Ansätze in der Technologiestrategie und Technology-Push-Ansätze im hieraus abgeleiteten Portfolio getrennt voneinander betrachtet, eine integrative Umsetzung beider Ansätze findet nicht statt. Ebenso erfolgt weder eine Reifegradbewertung der eingesetzten Technologien, noch eine Analyse von dynamischen Entwicklungen in den technologischen Leistungsparametern. [139]

LEE et al. (2017) verfolgt in seinem Ansatz eine reine Market-Pull-Strategie, in der die Technologien anhand von Attraktivität und Realisierbarkeit in den Kontext des Marktbedarfs eingeordnet werden. Die dynamischen Entwicklungen sowie die aktuelle Technologiereife fließen nur indirekt in die Bewertung ein. Ein Technology-Push-Ansatz wird nicht berücksichtigt. Durch die Wechselwirkungsanalyse werden lediglich die Abhängigkeiten zwischen Märkten und Produkten auf oberster Ebene der Technologieroadmap identifiziert, eine Analyse von Abhängigkeiten in den Ebenen der Technologie und Projektebene findet nicht statt. [90]

### 3.6 Konkretisierung der Zielstellung

Aus der Bewertung der bekannten Ansätze ist erkennbar, dass die klassischen Methoden ein Defizit in Hinblick auf die Anforderungen an eine Methode zur strategischen Technologieplanung in komplexen dynamischen Technologiefeldern wie ASR aufweisen, das bisherige Forschungsaktivitäten nicht schließen können. Daher ist der Ansatz dieser Arbeit die Kombination und Adaption bestehender Methoden des Technologiemanagements mit dem Ziel, die aufgezeigten Lücken zu schließen. Aus den Bewertungen in Abschnitt 3.5.1 ist erkennbar, dass die Wechselwirkungsanalyse eine Vielzahl der gestellten Anforderungen erfüllt, jedoch ein Defizit im Bereich der Berücksichtigung von Technologiereife besitzt. Auch die Verfolgung von Technology-Push- oder Market-Pull-Ansätzen ist nur bedingt möglich. Diese Defizite werden durch das Technologieroadmapping adressiert. Der Handlungsbedarf für diese Arbeit liegt in der Kombination der Methoden des Technologieroadmappings und der Wechselwirkungsanalyse, mit der Zielsetzung eines integrativen Methodenansatzes, der die strategische Technologieplanung innovativer Technologiefelder, wie ASR, unterstützt.

Die zu realisierende Methode muss eine Priorisierung von Technologieprojekten in Bezug auf eine definierte Technologiestrategie ermöglichen. Frühzeitig soll ein Abgleich der Anforderungen stattfinden und bewertet werden, ob sich strategische Zielsetzungen auf Basis der technologischen Kompetenzen und möglicher Weiterentwicklungspotenziale innerhalb des Unternehmens realisieren lassen [155]. Weiterhin soll im Rahmen der Methode die integrative Berücksichtigung

von Technology-Push- und Market-Pull-Ansätzen realisierbar sein, um sowohl Veränderungen des Marktbedarfs als auch technologische Weiterentwicklungen einer Nutzung zuzuführen. Um die Bewertung verschiedener Technologieprojekte zu ermöglichen, soll ein Reifegradmodell zur Anwendung kommen. Dieses soll die Leistungsfähigkeit einer Technologie beschreiben und vergleichbar machen. Die Vorteile der Wechselwirkungsanalyse liegen in der Berücksichtigung von dynamischen Entwicklungen und der Ermittlung komplexer Abhängigkeiten. Diese Vorteile sollen ebenfalls in den Methodenansatz einfließen.

Es gilt, die Wechselwirkungsanalyse so zu erweitern, dass sie mit dem mehrdimensionalen Ansatz des Technologieroadmappings kombinierbar ist und gleichzeitig die Wirkbeziehung zwischen den Bewertungselementen um den Faktor der Technologiereife erweitert wird. Die qualitative Bewertung wird in eine quantitative Bewertung überführt. Der workshopbasierte Ansatz des Technologieroadmappings zur Informationsbeschaffung soll beibehalten werden, um eine breite Informationsbasis sicherzustellen. Jedoch sollen Weiterentwicklungen auf Markt- oder Technologieseite ohne Mehraufwand zu integrieren sein und die statische Methodik des Technologieroadmapping um eine dynamische Komponente erweitert werden. Ferner soll zeit- oder ergebnisorientiert eine Überarbeitung der Technologieroadmap stattfinden und den dynamischen Entwicklungen des Unternehmensumfelds Rechnung getragen werden. Die Stärken der Methoden und die entsprechende Zielstellung zur Entwicklung eines integrativen Methodenansatzes für die strategische Technologieplanung ist in Tabelle 3.5 zusammengestellt.

**Tabelle 3.5:** Kombination geeigneter Methoden

Anforderung	Technologie- roadmapping	Wechselwirkungs- analyse	Zielsetzung
Priorisierung von Technologieprojekten	●	◐	Einbeziehung von Abhängigkeiten der Technologieprojekte in die Priorisierung
Kombination von Market-Pull und Technology-Push	●		Abbildung von Market-Pull/Technology-Push auf Seiten der Wechselwirkungsanalyse
Berücksichtigung von Technologiereife	●		Adaption der Wechselwirkungsanalyse zur Berücksichtigung von Technologiereife
Berücksichtigung von Dynamik		●	Abbildung dynamischer Änderungsprozesse durch Revision der Technologieroadmap
Ermittlung komplexer Abhängigkeiten		●	Adaption der Wechselwirkungsanalyse auf die Dimensionen des Technologieroadmappings

● gut geeignet    ◐ bedingt geeignet

Um einen integrativen Methodenansatz aus Technologieroadmapping und Wechselwirkungsanalyse realisieren zu können, muss die klassische Wechselwirkungsanalyse um Funktionalitäten erweitert werden. Der in Abschnitt 3.4.2 vorgestellte Ansatz von MÖHRLE zeigt bereits auf, wie die Wechselwirkungsanalyse erweitert und mit anderen Ansätzen kombiniert werden kann. Die Grundlage für diese Erweiterung stellt die sogenannten Graphentheorie dar. Mit der Graphentheorie

rie wird die Beschreibung und Analyse von komplexen Netzwerken und den intern bestehenden Abhängigkeiten ermöglicht. Die Analyse kann hierbei verschiedene Zielstellungen verfolgen. Ferner existieren in der Graphentheorie Konstrukte zur Beschreibung zeitlicher Änderungsprozesse in Netzwerken und zur Repräsentation quantitativer Bewertungsgrößen, wie der Technologiereife [39, 61]. Die Graphentheorie zeigt ein Potenzial, die in Tabelle 3.5 definierten Zielstellungen für die Kombination der Methodenansätze zu unterstützen. Um die Anwendungspotenziale der Graphentheorie zur Entwicklung eines integrativen Methodenansatzes zu untersuchen und die inhaltliche Basis für die weitere Methodenentwicklung in Kapitel 5 zu schaffen, werden im nächsten Kapitel die Grundlagen der Graphentheorie beschrieben. Weiterhin werden die Anwendungspotenziale zur Kombination der Wechselwirkungsanalyse und des Technologieroadmappings untersucht.

### 3.7 Zusammenfassung

Das zentrale Ziel des Technologiemanagements ist die Entwicklung der technologischen Unternehmenskompetenzen, sodass die richtigen Technologien zum richtigen Zeitpunkt für die Produktentstehung zur Verfügung stehen. Hierzu ist es bereits in früher Phase notwendig, strategierelevante Technologien zu identifizieren und ihre Entwicklung entsprechend der Unternehmensausrichtung zu steuern. Im Rahmen des Technologiemanagements existiert eine Vielzahl von Ansätzen. Sowohl in der praxisrelevanten Anwendung als auch in den Forschungsaktivitäten werden eine Vielzahl von unterschiedlichen Fragestellungen adressiert. Die speziellen Anforderungen aus innovativen Technologiefeldern wie ASR lassen jedoch die Verwendung bestehender Ansätze nicht zu. Dies begründet sich insbesondere durch dynamische Entwicklungsprozesse innerhalb des Technologiefelds, die gesteigerte Komplexität der Wirkbeziehungen und dem Bedarf nach einem Einbezug der Reifegrade in die Bewertung. Als zielführend stellt sich ein integrativer Methodenansatz durch die Kombination der Wechselwirkungsanalyse mit dem Technologieroadmapping heraus. Die Entwicklung eines solchen Ansatzes bedarf einer Erweiterung der klassischen Wechselwirkungsanalyse durch Ansätze der Graphentheorie.



## 4 Potenziale der Graphentheorie zur Anwendung im Technologiemanagement

Nachdem im vorherigen Kapitel die Grundlagen des Technologiemanagements erörtert sowie die relevanten Methoden im Hinblick auf die Handlungsbedarfe beschrieben sind, gilt es, die in Abschnitt 3.6 angeführten Zielstellungen in einen neuartigen Methodenansatz zu überführen. Wie zuvor beschrieben, sollen die Methode der Wechselwirkungsanalyse mit dem Technologieroadmapping kombiniert und in einem integrativen Gesamtansatz zusammengeführt werden. Hierfür ist es jedoch notwendig, die Grundlagen der Wechselwirkungsanalyse methodisch auszuweiten. Im Rahmen von Abschnitt 1.5 wurde die Hypothese aufgestellt, dass die Anwendung von graphentheoretischen Ansätzen hierzu einen Mehrwert bieten kann.

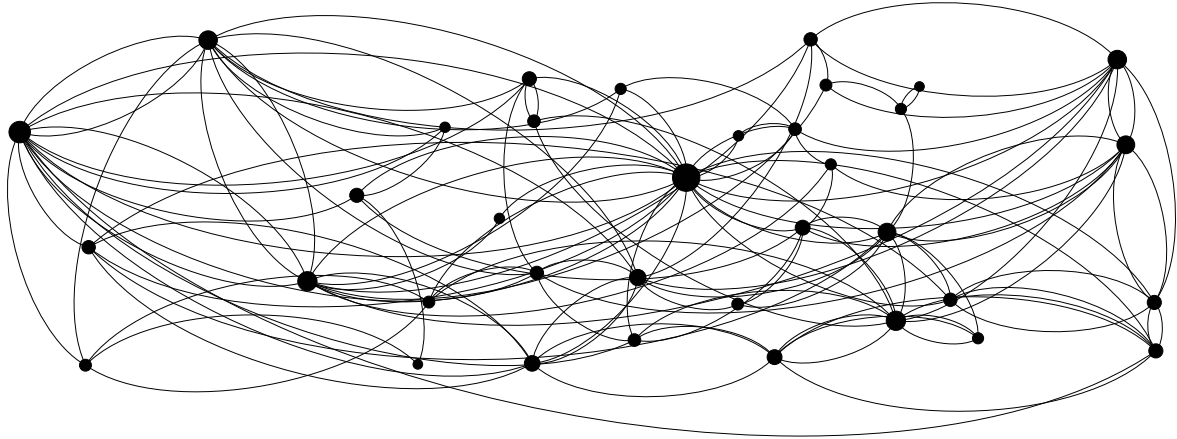
In vielen Anwendungsfällen lassen sich Wechselwirkungsanalysen direkt in eine Problemstellung der Graphentheorie überführen (vgl. [108, 116]). Die Graphentheorie als Teilgebiet der Mathematik untersucht das Verhalten von komplexen Netzwerken und die Abhängigkeiten innerhalb dieser Netzwerke. Hierbei wird eine breite Anzahl an Analyseansätzen und Algorithmen verwendet, die Potenziale für die Kombination von Wechselwirkungsanalyse und Technologieroadmapping bieten. In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen der Graphentheorie in Abschnitt 4.1 dargestellt und verschiedene Ansätze zur Analyse von Graphen in Abschnitt 4.2 beschrieben. Ziel dieses Kapitels ist es, die Übertragbarkeit vorhandener Analyseansätze in der Graphentheorie auf den zu entwickelnden Methodenansatz zu untersuchen. Es sollen geeignete Ansätze abgeleitet werden, mit denen die Wechselwirkungsanalyse erweitert werden kann, um eine Kombination mit dem Technologieroadmapping zu ermöglichen.

Als Ergebnis werden die Analogien zwischen Wechselwirkungsanalyse und Graphentheorie in Abschnitt 4.4 aufgezeigt und die Potenziale der Graphentheorie zur Erweiterung der Wechselwirkungsanalyse für einen integrativen Methodenansatz in der strategischen Technologieplanung dargelegt. Somit wird die Grundlage für die anschließende Entwicklung eines Methodenansatzes in Kapitel 5 gebildet.

### 4.1 Grundlagen der Graphentheorie

Die Ursprünge der Graphentheorie sind auf die 1736 von Leonhard Euler veröffentlichte Lösung für das Königsberger Brückenproblem zurückzuführen. Ziel bei dieser Problemstellung war es, einen Rundweg durch die Stadt Königsberg zu finden, ohne eine der sieben Brücken innerhalb der Stadt zweimal zu überqueren. Der Begriff *Graph* wurde erstmals durch den Mathematiker James Joseph Sylvester verwendet, der auf die graphischen Notationen chemischer Formeln anspielte. Die Graphentheorie findet heutzutage verbreitet Einsatz in der Entscheidungsunterstützung und Prozessbeschreibung [206]. So bauen beispielsweise Gozintographen zur Beschreibung von Montage- und Produktionsprozessen und die Netzplantechnik zur Terminplanung von Projekten auf der Graphentheorie auf. Hierüber hinaus wird die Graphentheorie insbesondere in der Analyse sozialer Netzwerke angewendet.

Das breite Anwendungsfeld begründet sich zum einen durch die Fülle an Algorithmen zur Lösung graphentheoretischer Problemstellungen, zum anderen aber auch durch die Möglichkeiten einer anschaulichen Visualisierung von Problemstellungen. Die Visualisierung unterstützt vorwiegend in der Strukturierung komplexer Fragestellungen und der Ergebnisdarstellung. Eine beispielhafte Visualisierung für eine graphentheoretische Problemstellung ist in Abbildung 4.1 dargestellt.



**Abbildung 4.1:** Exemplarische Darstellung eines Graphen

Die Graphentheorie stellt ein Teilgebiet der Mathematik dar, das sich mit den Eigenschaften von *Graphen*  $G$  und den Beziehungen innerhalb der Graphen beschäftigt. Graphen sind abstrakte mathematische Strukturen, die aus einer Menge von *Knoten*  $V$  und einer Menge von *Kanten*  $E$  bestehen und ein *Netzwerk* bilden. Eine Kante  $\{v_1, v_2\} \in E$  verbindet genau zwei Knoten miteinander. Verbindet eine Kante zwei Knoten oder besitzen zwei Kanten einen gemeinsamen Knoten, so werden die Knoten bzw. Kanten als *benachbart* oder *adjazent* bezeichnet. Dabei wird die Kante als *inzident* zu den Knoten bezeichnet. Die Menge der Kanten und Knoten kann sowohl *endlich* als auch *unendlich* sein. Da in dieser Arbeit ausschließlich endliche Graphen zum Einsatz kommen, wird der Begriff Graph als einheitliche Bezeichnung verwendet. Mathematisch lässt sich ein Graph mit

$$G = (V, E) \quad (4.1)$$

beschreiben. Graphen können über eine Reihe von Bezeichnungen charakterisiert werden, von denen im Folgenden die wichtigsten kurz erläutert werden. Ein Graph, bei dem die Knoten paarweise verbunden sind, wird als *vollständig* bezeichnet. Es existiert also zu jedem Knoten jeweils eine Verbindung zu allen übrigen Knoten. Jeder Graph besitzt eine *Ordnung* und eine *Größe*. Die Ordnung wird über die Anzahl der Knoten von  $G$  bestimmt und als  $|G|$  beschrieben. Die Anzahl der Kanten  $|E|$  von  $G$  definiert die Größe des Graphen.

Neben vollständigen Graphen finden in der Praxis hauptsächlich *bipartite Graphen* und *n-partite Graphen* ihre Anwendung. In einem bipartiten Graphen lässt sich die Knotenmenge  $V$  in zwei disjunkte Teilmengen  $V_1$  und  $V_2$  zerlegen, sodass keine adjazenten Knoten in den gleichen Teilmengen liegen. Für bipartite Graphen gilt:

$$V = V_1 \cup V_2, V_1 \cap V_2 = \emptyset, \text{ sowie } \{v_1, v_2\} \in E \text{ mit } v_1 \in V_1 \text{ und } v_2 \in V_2 \quad (4.2)$$

In einem  $n$ -partiten Graphen lassen sich die Knotenmenge  $V$  in  $n$  disjunkte Teilmengen  $V_1, \dots, V_n$  unterteilen, für die keine adjazenten Knoten in der gleichen Menge  $V_i$  zu finden sind. Ein  $n$ -partiter Graph lässt sich beschreiben als:

$$\forall i \in \{1, \dots, n\} : v \in V_i \wedge w \in V_i \rightarrow \{v, w\} \notin E \quad (4.3)$$

Ein weiteres zentrales Konzept der Graphentheorie stellt der *Teilgraph* dar. Jeder Graph  $G = (V, E)$  lässt sich in eine bestimmte Anzahl von Teilgraphen  $H = (V_H, E_H)$  zerlegen, sodass  $V_H \subseteq V$  und  $E_H \subseteq E$  gilt. Gehören auch die inzidenten Kanten von  $v$  in  $H$  zu  $H$ , so wird der Teilgraph als *induziert* bezeichnet.

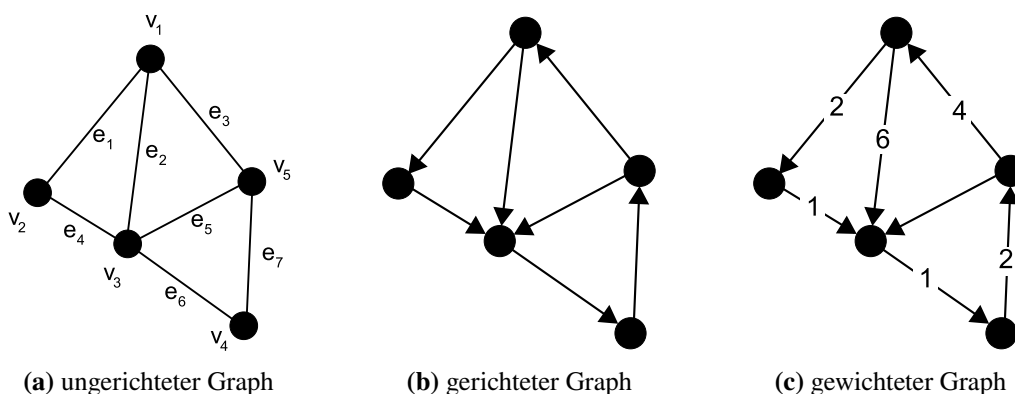
**Gerichtete Graphen** Falls die Kanten  $E$  eines Graphen  $G$  zusätzlich eine Orientierung aufweisen, also von einem Knoten  $v_1$  auf einen Knoten  $v_2$  zeigen, wird von einem *gerichteten* Graphen gesprochen und die gerichteten Kanten können auch als *Pfeile* bezeichnet werden [83]. Die mathematische Beschreibung von ungerichteten Graphen und gerichteten Graphen lautet wie folgt:

$$G = (V, E) \text{ heißt ungerichteter Graph, falls } E \subseteq \{\{v_1, v_2\} \mid v_1, v_2 \in V, v_1 \neq v_2\} \quad (4.4a)$$

$$G = (V, E) \text{ heißt gerichteter Graph, falls } E \subseteq (V \times V) \setminus \{(v, v) \mid v \in V\} \quad (4.4b)$$

Im letzten Fall wird die Menge der Kanten  $E$  durch das Komplement aus maximaler Kantenanzahl, definiert durch  $(V \times V)$ , und den Beziehungen der Knoten zu sich selbst definiert.

**Visualisierung von Graphen** Graphen können in Form von Diagrammen visualisiert werden, bei denen die Knoten als Punkte und die Kanten als Linien (ungerichtete Graphen) oder Pfeile (gerichtete Graphen) dargestellt werden. In Abbildung 4.2 ist die Visualisierung unterschiedlicher Graphenformen exemplarisch dargestellt.



**Abbildung 4.2:** Schematische Visualisierung verschiedener Graphentypen

Diese Darstellung ermöglicht die Beschreibung komplexer Graphenstrukturen in einer für den Menschen verständlichen Form. Hierbei wird auf verschiedene Algorithmen zur Darstellung von Graphen zurückgegriffen. Für die ästhetisch ansprechende Darstellung sehr komplexer und großer Netzwerke bieten sich die sogenannten kräftebasierten Autolayout-Algorithmen an [81].



Hierbei werden auf Grundlage von graphenbezogenen Kenngrößen wie Knotengraden oder Zentralitätsmaßen die Abstoßung und Anziehung zwischen den Knoten berechnet. Entsprechend der wirkenden Kraft wird für jeden Knoten eine Position im Netzwerk berechnet, solange bis ein stabiler Zustand erreicht wird. Ergänzend zu diesen Möglichkeiten der Layouterstellung können über Farbe und Größe der Knoten weitere Informationen in der Darstellung repräsentiert werden. Für die Visualisierung stehen verschiedene Softwaretools zur Verfügung. Die Software GEPHI [6] bietet beispielsweise Möglichkeiten zur dreidimensionalen Darstellung großer Netzwerke in Echtzeit.

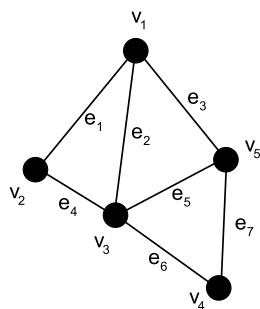
**Inzidenz und Adjazenzmatrix** Zur mathematischen Beschreibung eines Graphen kann die sogenannte *Adjazenzmatrix* genutzt werden. Die Matrix  $A(G)$  eines Graphen  $G$  mit der Knotenmenge  $V = \{v_1, \dots, v_n\}$  und der Kantenmenge  $E$  ist eine quadratische  $n \times n$ -Matrix mit dem Schema:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \text{ mit } a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{falls } \{v_i, v_j\} \in E, \\ 0, & \text{falls } \{v_i, v_j\} \notin E. \end{cases} \quad (4.5)$$

Sie beschreibt die Beziehung zwischen den Knoten des Graphen über die Matrixeinträge und kann für die Berechnung charakteristischer Kenngrößen wie dem *Knotengrad* des Graphen genutzt werden (vgl. Abschnitt 4.2.1). Analog zur Adjazenzmatrix lässt sich für jeden Graphen auch eine *Inzidenzmatrix* definieren. Hierbei werden jeder Kante durch die Einträge die inzidenten Knoten zugeordnet. Die Matrix drückt aus, welche Kante welche Knoten miteinander verbindet. Die Richtung der Kanten wird über entsprechende Vorzeichen bestimmt. Für einen gerichteten Graphen  $G$  mit der Knotenmenge  $V = \{v_1, \dots, v_n\}$  und der Kantenmenge  $E = \{e_1, \dots, e_m\}$  ist die Inzidenzmatrix  $I(G) = [b_{ij}]$  die  $n \times m$ -Matrix, für die gilt:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{falls } e_j = \{v_i, x\}, \\ 0, & \text{falls } v_i \notin e_j, \\ -1, & \text{falls } e_j = \{x, v_i\}. \end{cases} \quad (4.6)$$

In Abbildung 4.3 sind die Adjazenz- und Inzidenzmatrix für einen exemplarischen Graphen dargestellt. Erkennbar ist, dass der ungerichtete Graph aus 5 Knotenelementen und 7 Kanten besteht und entsprechend die Inzidenzmatrix mehr Zeilen aufweist.



(a) exemplarischer Graph

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

(b) Adjazenzmatrix

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

(c) Inzidenzmatrix

**Abbildung 4.3:** Aufbau von Adjazenz- und Inzidenzmatrix

Adjazenz- und Inzidenzmatrizen von Graphen besitzen eine besondere Bedeutung für die Speicherung und rechnergestützte Verarbeitung von Graphen, wobei die Adjazenzmatrix die einfachste Darstellungsform eines Graphen bietet. Jedoch steigen Speicherplatz- und Zeitbedarf für Traversierungsoperationen quadratisch mit der Ordnung des Graphen an, weshalb für die Verarbeitung von Graphen höherer Ordnung zumeist auf die Inzidenzmatrix zurückgegriffen wird. Auf weitere Formen zur Beschreibung von Graphen wird im Rahmen von Abschnitt 4.3 eingegangen. [169, 206].

**Benannte und gewichtete Graphen** Um die in einem Graphen gespeicherten Informationen zu ergänzen, bestehen neben der Richtungszuweisung weitere Möglichkeiten, um Eigenschaften von Knoten oder Kanten zu ergänzen. Damit die Visualisierung von Graphen erleichtert wird, können die Knoten und Kanten eines Graphen durch einen Namen erweitert werden. In einem *benannten Graphen*  $G = (V, E, f, g)$  weisen die Abbildungen  $f$  und  $g$  den jeweiligen Kanten oder Knoten einen Namen zu. Eine weitere Möglichkeit zur Informationsanreicherung stellen *kantengewichtete* und *knotengewichtete Graphen* dar. Hierzu wird das Graphentupel  $G = (V, E)$  um ein Kantengewicht  $w(e)$  oder Knotengewicht  $w(v)$  erweitert. Diese Gewichtung weist jeder Kante oder jedem Knoten aus  $G$  eine reelle Zahl zu. Durch diese Zusatzinformation können beispielsweise Entfernungen zwischen zwei Knoten in die Graphendarstellung übernommen werden. Ein kantengewichteter Graph lässt sich beschreiben als:

$$G = (V, E, w), \text{ sodass } w : E \rightarrow \mathbb{R} \text{ eine Abbildung darstellt,} \quad (4.7a)$$

die jeder Kante  $e$  ein Gewicht  $w(\{v_1, v_2\})$  zuordnet.

Für einen knotengewichteten Graph gilt dementsprechend:

$$G = (V, E, w), \text{ sodass } w : V \rightarrow \mathbb{R} \text{ eine Abbildung darstellt,} \quad (4.7b)$$

die jedem Knoten  $v$  ein Gewicht  $w$  zuordnet.

Die Gewichtung eines Graphen kann entsprechend auch in der Adjazenz- und Inzidenzmatrix des Graphen abgebildet werden, indem die Matrixeinträge  $a_{ij}$  mit der Gewichtung  $w$  der entsprechenden Kante multipliziert werden. Komplexere Formen von Graphentypen sind die sogenannten Multigraphen, bei denen mehrfache Kanten und Schleifen vorkommen, sowie Hypergraphen, bei denen eine Kante mehr als zwei Knoten verbinden kann. Diese Graphenarten werden in dieser Arbeit jedoch nicht betrachtet.

**Wege** Ein weiteres Konstrukt der Graphentheorie ist der sogenannte *Weg*, der zwei Knoten  $v_1$  und  $v_{k+1}$  innerhalb eines Graphen miteinander verbindet. Ein Weg  $P_n$  wird für  $n \geq 2$  beschrieben durch eine endliche Folge von Knoten  $V(P_n) = (v_1, \dots, v_{k+1})$  mit den hierzu entsprechenden Kanten  $E(P_n) = \{v_i, v_{i+1}\} \in E, i \in \{1, \dots, k\}, k \in \mathbb{N}_0$ . In einem gerichteten Graphen können die Kanten nur entlang ihrer Richtung durchlaufen werden.  $v_1$  wird als Anfangsknoten und  $v_{k+1}$  als Endknoten des Weges bezeichnet. Der Grad des Pfades wird durch  $n$  (Anzahl der durchlaufenen Kanten) beschrieben, sofern keine Kante mehrfach verwendet wird. Die Länge des Weges ist beschrieben durch  $k = |P|$ . Gilt hier  $v_1 = v_{k+1}$ , sind Anfangs- und Endknoten also identisch, wird von einem geschlossenen Weg oder auch Kreis gesprochen. In einem kantengewichteten Graphen wird zusätzlich das Gewicht der Kanten in die Berechnung einbezogen. Somit besitzt

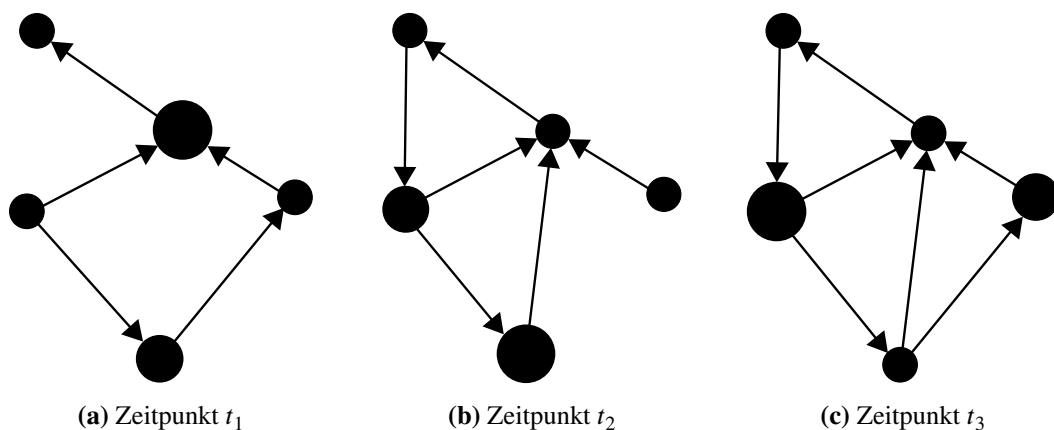
jeder Weg in  $G$  eine definierte Länge in Abhängigkeit der Kantengewichte. Für einen Graphen  $G = (V, E, w)$  mit  $V(P_n) = (v_1, \dots, v_{k+1})$  als Weg auf  $G$  errechnet sich die Länge zu:

$$k = \sum_{k=0}^{k-1} w\{v_k, v_{k+1}\} \quad (4.8)$$

Existieren innerhalb eines Graphen mehrere Wege, so können die Längen der Wege durch die Kantengewichtung variieren.

Zum Auffinden von Wegen durch einen Graphen stehen unterschiedliche Suchalgorithmen zur Verfügung. Zu den wichtigsten Algorithmen zählen die Tiefensuche (DFS, depth-first search), bei der versucht wird, den Zielknoten eines Weges zunächst in der Tiefe des Graphen zu finden, und die Breitensuche (BFS, breadth-first search), bei der zunächst in der Breite des Graphen gesucht wird. Für eine tiefgreifende Betrachtung der Algorithmen wird an dieser Stelle auf die entsprechende Literatur verwiesen [29, 83, 169, 206].

**Dynamische Graphen** Um zeitliche Entwicklungsverläufe in Graphen abzubilden, existiert das Konzept der dynamischen Graphen. Hierbei besitzen Knoten und Kanten einen zeitlichen Gültigkeitsbereich und sind keine statischen Größen. Alternativ können auch Knoten- oder Kantenattributen wie der Kantengewichtung zeitliche Verläufe zugewiesen werden. Über den Zeitverlauf erfahren entsprechend auch die charakteristischen Kenngrößen des Graphen, wie der Vernetzungsgrad, eine Änderung. Die einzelnen Zeitschritte sind als jeweils eigenständiger Graph zu interpretieren. Eingesetzt wird das Konzept der dynamischen Graphen beispielsweise in der Analyse von Transportnetzwerken zum Auffinden kürzester Wege [8]. In Abbildung 4.4 ist ein dynamischer Graph beispielhaft dargestellt. Hierbei sind drei Zeitzustände  $t_1$  bis  $t_3$  des gerichteten Graphen und die entsprechende dynamische Entwicklung abgebildet. Über den Zeitverlauf erfahren sowohl die Knotengewichte  $w$ , dargestellt durch den Knotendurchmesser, als auch die Definition der Kanten eine Änderung.



**Abbildung 4.4:** Darstellung dynamischer Graphen

Nachdem die Grundlagen der Graphentheorie beschrieben sind, wird im nächsten Abschnitt tiefer auf die Analysemöglichkeiten innerhalb von Graphen eingegangen, um aufzuzeigen, wie diese Ansätze auf die zu erarbeitende Methodik übertragen werden können.

## 4.2 Analyseansätze der Graphentheorie

In der Praxis kommen zur Beschreibung komplexer Zusammenhänge Graphen hoher Ordnung  $G$  zum Einsatz, die in Abhängigkeit der adressierten Problemstellung auf unterschiedliche Weise analysiert werden. Die für diese Arbeit relevanten Ansätze werden in diesem Abschnitt kurz erläutert. Für eine detaillierte Beschreibung wird auf die entsprechende Literatur verwiesen [29, 39, 73, 83, 169, 206]. Bei der Analyse kann zwischen einer Mikro-, Meso- und Makroanalyse unterschieden werden [83]. In der Mikroanalyse werden Graphen auf Knotenebene analysiert, um besonders bedeutsame Knoten aufgrund ihrer Eigenschaften im Netzwerk zu identifizieren. Auf die Betrachtung von Teilgraphen, beispielsweise zur Bildung von abgrenzbaren Modulen innerhalb eines Graphen, ist die Mesoanalyse ausgerichtet. Diese Form der Analyse findet insbesondere in der Betrachtung sozialer Netzwerke eine große Rolle [113]. Die Makroanalyse als letzte Form der Analyse vergleicht verschiedene Graphen auf Grundlage statistischer Eigenschaften (z. B. Vernetzungsgrad) miteinander.

### 4.2.1 Mikroanalyse

In der Mikroanalyse werden Graphen auf ihrer Knotenebene betrachtet, um besonders relevante Knoten oder Kanten innerhalb eines Graphen zu identifizieren. Die Fragestellung definiert, was als relevanter Knoten bzw. relevante Kanten anzusehen ist. Eines der wichtigsten Maße in der Mikroanalyse ist der sogenannte *Knotengrad* (englisch: *degree*), der die Anzahl inzidenter Kanten zu einem Knoten beschreibt. Bei einem ungerichteten Graphen  $G = (V, E)$  ist der Knotengrad  $d_G(v)$  für jeden Knoten  $v \in V$  definiert durch:

$$d_G(v) = |\{ \{v, w\} \mid \{v, w\} \in E \}| \quad (4.9)$$

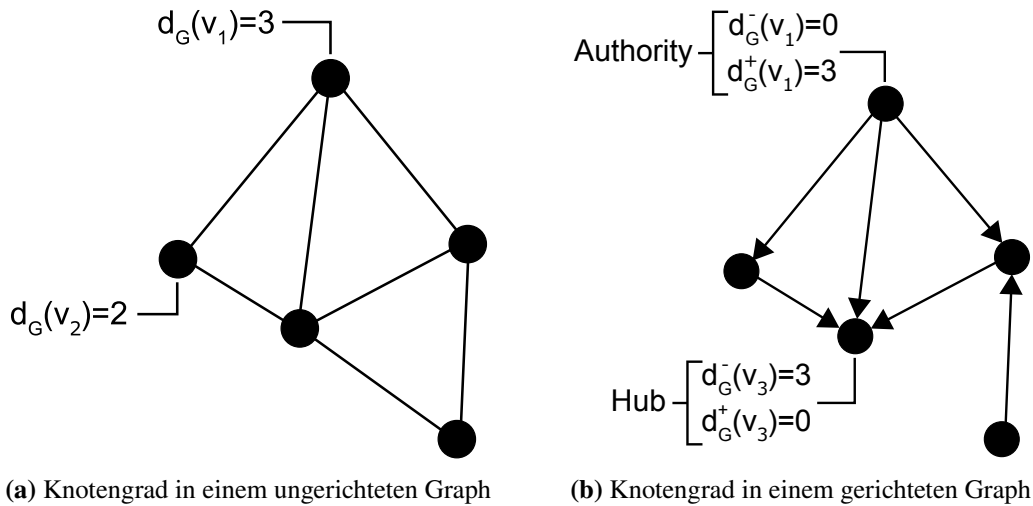
Besitzt ein Knoten einen Grad von  $d_G(v) = 0$ , wird der Knoten als *isoliert* bezeichnet. Das Konstrukt des Knotengrads lässt sich auf gerichtete Graphen erweitern. In einem gerichteten Graphen ist zu unterscheiden, ob inzidente Pfeile auf den Knoten oder von diesem weg zeigen. Dementsprechend kann zwischen dem *Eingangsgrad*  $d_G^-(v)$  und dem *Ausgangsgrad*  $d_G^+(v)$  differenziert werden. Für gerichtete Graphen lässt sich Gleichung 4.9 somit erweitern zu:

$$d_G^-(v) = |\{ \{x, w\} \in E \mid w = v \}|, \quad (4.10a)$$

$$d_G^+(v) = |\{ \{x, w\} \in E \mid x = v \}|. \quad (4.10b)$$

Besonders einfach lassen sich Eingangs- und Ausgangsgrad anhand der Adjazenzmatrix berechnen. Hier lässt sich der Eingangsgrad  $d_G^-(v_i)$  durch die Spaltensumme von  $i$  und der Ausgangsgrad  $d_G^+(v_i)$  durch die Zeilensumme von  $i$  berechnen. Die Knotengrade stellen ein Maß für den Grad der Verknüpfung dar und charakterisieren die Eigenschaft des Knotens im Verhältnis zu seinen adjazenten Knoten. Besitzt ein Knoten einen Eingangsgrad von  $d_G^- = 0$ , wird dieser als *Quelle* bezeichnet. Hier zeigen alle inzidenten Kanten vom Knoten weg. Knoten mit einem Ausgangsgrad von  $d_G^+ = 0$  werden hingegen als *Senke* bezeichnet, da alle inzidenten Kanten auf den Knoten zeigen. Solche Knotentypen sind insbesondere bei der Analyse von Informationsflüssen von Interesse [73, 83].

Innerhalb eines gerichteten Graphen lassen sich der Ausgangs- und Eingangsgrad eines Knotens ins Verhältnis zu den Knotengraden des restlichen Graphen setzen, um die Bedeutung des Knotens innerhalb des Graphen zu bestimmen. Dieses Konzept wurde 1999 von JON KLEINBERG unter dem Namen *hypertext-induced topic selection HITS* für die automatisierte Beurteilung von Webseiten innerhalb des *World-Wide-Web* www vorgestellt [77]. Knoten, die viele adjazente Knoten besitzen, werden als besonders relevant angesehen. Verfügt ein Knoten über einen im Vergleich zum restlichen Graph hohen Eingangsgrad, wird er als *Hub* bezeichnet. Als *Authorities* werden hingegen Knoten mit einem hohen Ausgangsgrad bezeichnet. In einem ungerichteten Graphen existieren dementsprechend nur Hubs, also Knoten mit besonders hohen Knotengraden. Neben der Richtung kann auch die Gewichtung einer Kante in die Berechnung des Knotengrads einbezogen werden, somit ergibt sich der *gewichtete Knotengrad*. In Abbildung 4.5 ist eine Übersicht über verschiedene Analysemöglichkeiten auf Grundlage der Knotengrade dargestellt und die Kennzeichnung von Hubs und Authorities verdeutlicht.



**Abbildung 4.5:** Analysemöglichkeiten der Graphentheorie auf Mikroebene

Ein weiteres wichtiges Analyseinstrument in der Mikroanalyse ist die Bestimmung der Zentralitätsmaße eines Knotens. Die *Nahzentralität* drückt aus, wie nah im Sinne einer Distanz der ausgewählte Knoten jedem anderen Knoten innerhalb des Graphen ist. Mit der *Zwischenzentralität* wird ausgedrückt, wie viele kürzeste Wege durch den ausgewählten Knoten verlaufen. Hervorgehoben werden soll an dieser Stelle die sogenannte *Gradzentralität*  $C_i^d$  eines Knoten  $v_i$ . Sie wird definiert durch die Anzahl inzidenter Kanten im Verhältnis zur Größe des Graphen (vgl. Abschnitt 4.1). Hierdurch wird eine Neutralisierung des Zentralitätsmaßes erreicht und eine Vergleichbarkeit von verschiedenen Graphen erreicht. Über die Gradzentralitäten ist es ebenfalls möglich, Hubs und Authorities ausfindig zu machen.

Die Gradzentralität ist für einen Graphen  $G = (V, E)$  mit  $n$  Knoten  $v_i \in V$  und dem Knotengrad  $d_i = d_G(v_i)$  definiert als:

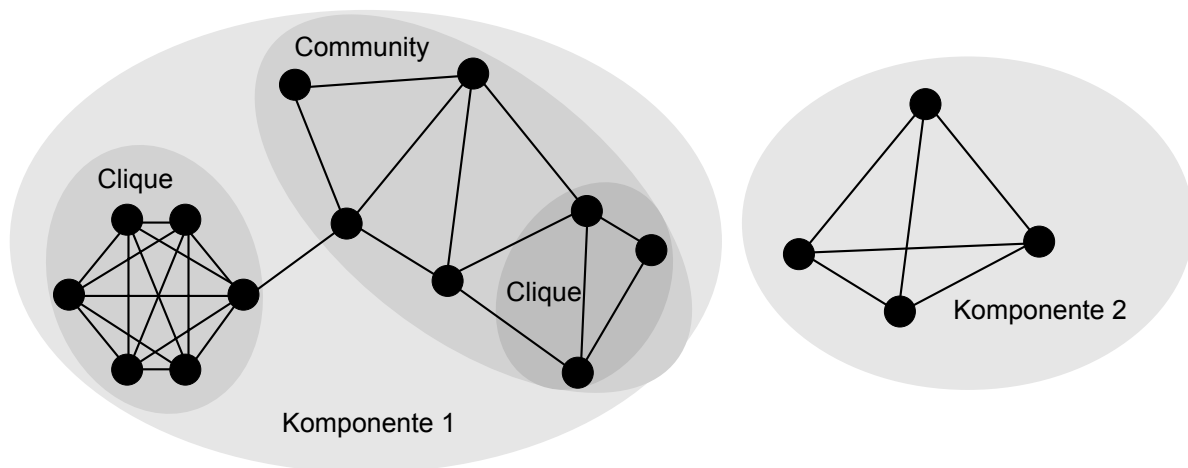
$$C_i^d = \frac{d_i}{(n-1)} \text{ mit } n > 1 \quad (4.11)$$

In der Praxis ist die Anwendung der Analysemöglichkeiten auf Mikroebene abhängig von der zu beantwortenden Fragestellung. In der Analyse sozialer Netzwerke spielen beispielsweise die Zentralitätsmaße eine übergeordnete Rolle, da sie eine Aussage über die Wichtigkeit bestimmter

Knoten für den Informationsfluss zwischen Personen liefern. In der Untersuchung von großen Datenstrukturen, wie sie auch in der Bibliometrie oder Patentanalyse zum Einsatz kommen, spielen die Knotengrade hingegen eine besondere Rolle, da durch vergleichsweise hohe Knotengrade Informationsquellen und Informationsssenken identifiziert werden können [73].

#### 4.2.2 Mesoanalyse

Die Mesoanalyse fokussiert sich darauf, innerhalb eines Graphen  $G$  Teilgraphen auf Grundlage von spezifischen Knoteneigenschaften zu bilden, um die Abhängigkeiten innerhalb komplexer Graphen zu analysieren. Mit dem *Zusammenhang* eines Graphen wird die Art der inneren Vernetzung beschrieben. Ein ungerichteter Graph gilt als zusammenhängend für den Fall, dass die Knoten paarweise über eine Kantenfolge des Graphen verbunden sind. Für einen beliebigen Knoten  $v$  lässt sich also ein Weg auf  $G = (V, E)$  finden, der den Knoten  $v \in V$  mit jedem anderen Knoten  $w \in V$  verbindet. Für gerichtete Graphen lassen sich weiterhin *stark* und *schwach* zusammenhängende Graphen unterscheiden. Ein gerichteter Graph  $G$  wird als stark zusammenhängend charakterisiert, falls zwischen zwei beliebigen Knoten  $\{v, w\} \in V$  sowohl ein gerichteter Weg von  $v$  nach  $w$  als auch von  $w$  nach  $v$  existiert. Ein schwach zusammenhängender Graph ist hingegen dadurch definiert, dass lediglich der zugehörige ungerichtete Graph von  $G$  zusammenhängend ist. Aufgrund der Zusammenhänge lässt sich jeder Graph  $G$  in eine oder mehrere *Komponenten*  $H$  aufteilen, wobei eine Komponente als maximal zusammenhängender Teilgraph von  $G$  definiert ist. So lässt sich ein bipartiter Graph  $G = (V, E)$  z. B. in zwei Komponenten  $H_1$  und  $H_2$  zerlegen und es existiert keine Kante  $e \in E$ , die die disjunkten Teilmengen der Komponenten verbindet.



**Abbildung 4.6:** Analysemöglichkeiten der Graphentheorie auf Mesoebene

Jede Komponente eines Graphen kann weiterhin in sogenannte *Communities* unterteilt werden. Communities bilden innerhalb eines Graphen einen induzierten Teilgraphen, der eine starke innere Vernetzung der Knoten aufweist. Zwischen den Communities ist die Vernetzung geringer, jedoch kann auch eine Überschneidung der Teilgraphen existieren. Weiterhin lässt sich eine Community in sogenannte *Cliquen* unterteilen, wobei Cliquen die kleinste Einheit von Communities darstellen. Für einen Graph  $G = (V, E)$  ist eine Clique  $C \subseteq G$  dadurch definiert, dass zwei beliebige Knoten  $\{v, w\} \in C$  durch eine Kante  $e \in C$  verbunden sind. Cliquen sind immer vollständige Teilgraphen von  $G$  (vgl. Abschnitt 4.1). Zur Identifikation von Communities und

Cliquen existiert eine Vielzahl von Algorithmen, wie beispielsweise der Grivan-Newman Algorithmus, mit dem sukzessive die Kanten mit der höchsten Zwischenzentralität entfernt werden bis ausschließlich Communities verbleiben [113].

In Abbildung 4.6 ist ein beispielhaftes Ergebnis einer Mesoanalyse abgebildet. Der dargestellte Graph besteht aus zwei Komponenten ohne gemeinsame Kante. Innerhalb von Komponente 1 ist eine größere Community erkennbar, die wiederum eine Clique enthält. Weiterhin ist eine zweite Clique über lediglich eine Kante mit der Community verbunden. Dies spricht für eine schwache gegenseitige Abhängigkeit.

#### 4.2.3 Makroanalyse

Bei der Makroanalyse, als oberste Analyseebene in der Graphentheorie, liegt der Fokus auf dem Vergleich mehrerer Graphen auf Grundlage von statistischen Größen [83]. Der mittlere Knotengrad  $\langle d \rangle$  eines Graphen und seine Standardabweichung  $\sigma_d$  gehören zu den wichtigsten Kenngrößen für den Vergleich verschiedener Graphen. Diese Kennwerte drücken aus, wie stark die innere Vernetzung des Graphen ist. Der mittlere Knotengrad lässt sich für einen Graphen  $G = (V, E)$  mit  $n$  Knoten, mit dem jeweiligen Knotengrad  $d_i$  und  $m$  Kanten über

$$\langle d \rangle = \frac{1}{n} \sum_{1 \leq i \leq n} d_i = \frac{2m}{n} \quad (4.12a)$$

berechnen, die Standardabweichung  $\sigma_d$  lässt sich über

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{1 \leq i \leq n} (d_i - \langle d \rangle)^2} \quad (4.12b)$$

bestimmen. Weiterhin können analog zu den Ansätzen der Mikroanalyse (vgl. Abschnitt 4.2.1) der minimale und maximale Knotengrad innerhalb des Graphen identifiziert sowie die Häufigkeitsverteilung der einzelnen Knotengrade innerhalb des Graphen bestimmt werden [83]. Somit lassen sich Aussagen über den Grad der Vernetzung des Graphen treffen und seine sogenannte *durchschnittliche Dichte*  $\rho(G)$  bestimmen. Hierzu wird die Anzahl der Kanten innerhalb des Graphen ins Verhältnis zur maximal möglichen Kantenanzahl gesetzt. Die Dichte ist als

$$\rho(G) = \frac{\langle d \rangle}{(n-1)} \quad (4.13)$$

gegeben und liefert eine Aussage darüber, wie stark die Knoten innerhalb des Graphen vernetzt sind. Nachdem die für diese Arbeit relevanten Analyseansätze der Graphentheorie erläutert sind, werden im nächsten Abschnitt Strukturen zur Speicherung und Verarbeitung von Graphen beschrieben, um die Grundlagen für den datentechnischen Aufbau des geplanten Methodenansatzes zu legen. Dies ist insbesondere von Interesse, da die datentechnische Abbildung und Verarbeitung von Graphen eine Grundvoraussetzung für eine systematische Analyse ist.

### 4.3 Strukturen zur Abbildung von Graphen

Für die Beschreibung großer Netzwerke stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Wie in Abschnitt 4.1 erläutert, können Graphen über Adjazenz- und Inzidenzmatrizen beschrieben werden. Adjazenzmatrizen eignen sich insbesondere für stark vernetzte Graphen, da ihr Speicherplatzbedarf quadratisch proportional zur Anzahl der Knoten und nahezu unabhängig von der Kantenanzahl ist. Hingegen eignen sich Inzidenzmatrizen für die Darstellung von schwach vernetzten Graphen, da ihr Speicherplatzbedarf mit der Anzahl der Kanten skaliert. Vorteile besitzen Adjazenz- und Inzidenzmatrix in der mathematischen Analyse, da durch die Matrixdarstellung auch auf entsprechende Operationen zurückgegriffen werden kann. [83, 131]

Alternativ können zur Darstellung sogenannte Kanten- und Knotenlisten genutzt werden. In einer Kantenliste ist der Graph durch eine Zahlenfolge

$$G = \{n_V; n_E; [v_i, v_j]; \dots; [v_m, v_n]\} \quad (4.14)$$

repräsentiert, in der  $n_V$  die Anzahl der Knoten und  $n_E$  die Anzahl der Kanten im Graph definieren. Die weiteren Paare  $[v_i, v_j]$  bilden die Kanten zwischen den Knoten. Die Knotenliste folgt einem vergleichbaren Ansatz, in dem in einer Zahlenfolge jedem Knoten seine adjazenten Knoten zugewiesen werden. Somit sind in einer Knotenliste

$$G = \{n_V; n_E; [d_G^+(v_i), v_j, \dots, v_k]; \dots; [d_G^+(v_n), v_m, \dots, v_l]\} \quad (4.15)$$

für jeden Knoten  $v_i \in V$  der Ausgangsgrad  $d_G^+(v_i)$  und die adjazenten Knoten  $v_j, \dots, v_k$  beschrieben. Die Komplexität dieser Darstellung steigt jedoch mit der Anzahl von Knoten und Kanten überproportional an, weshalb sie vornehmlich zur Abbildung kleiner Graphen genutzt wird [142]. Eine weitere Darstellungsform bilden die sogenannten Adjazenzlisten. In einer Adjazenzliste wird für jeden Knoten eine Liste generiert, die adjazente Knoten umfasst. Somit ähnelt die Darstellungsform stark der Knotenliste. In einem ungerichteten Graphen  $G$  umfasst die Adjazenzliste für den Knoten  $v \in V$  alle adjazenten Knoten von  $v$  und ergibt sich zu  $\{v_i \in V : \{v, v_i\} \in E\}$ . Diese Darstellungsform findet häufig Anwendung in der Abbildung von Graphen in Datenbanken, da eine simple Umsetzung in Arrays möglich ist.

Zur datentechnischen Speicherung von Graphen stehen ebenfalls verschiedene Ansätze zur Verfügung. In der einfachsten Form werden Graphen über relationale Datenbanken abgebildet. In solchen Datenbanken werden die Informationen über sogenannte Relationen in Tabellen und Tupeln, als Zeilen der Tabelle, gespeichert. Graphen lassen sich über zwei Tabellen abbilden, wobei eine Tabelle die Knoteninformationen enthält, welche über die in der zweiten Tabelle gespeicherten Kanteninformationen miteinander verknüpft werden. Somit erfolgt eine implizite Abbildung der Graphenstruktur ähnlich zur Abbildung in Adjazenzlisten. Relationale Datenbanken weisen jedoch gewisse Nachteile auf: Aufgrund der strengen Datenschemata ist eine Zusammenführung oder Erweiterung von Tabellen nur aufwendig umzusetzen, ebenso sind Traversierungsoperationen im Gegensatz zu Graphendatenbanken nur wenig performant. [78, 105, 131]

Zur expliziten Speicherung von Graphenstrukturen existieren die sogenannten Graphendatenbanken. Diese Arten von Datenbanken sind durch die Verwendung von graphenorientierten Datenmodellen für die Speicherung und Verarbeitung von Graphen besonders geeignet. Als Datenmodell hinter Graphendatenbanken werden *Property-Graphen* verwendet, die als gerichteter,



benannter und attribuerter Graph eine Sonderform darstellen. In dieser Form wird jedem Knoten und jeder Kante ein sogenanntes Label zugewiesen, über das Elemente beschrieben werden können. Weiterhin besteht über sogenannte *Properties* die Möglichkeit, Kanten oder Knoten um Attribute zu erweitern und so Daten in den Knoten oder Kanten zu speichern.

In Abbildung 4.7 ist der Aufbau eines Property-Graphen dargestellt, der die Abhängigkeit zwischen einem Studenten und einer Vorlesung beschreibt, jeweils repräsentiert durch einen Knoten innerhalb des Graphen. Die Knotentypen Student und Vorlesung lassen sich eindeutig über das Label identifizieren und sind über Properties mit einer Schlüssel-Wert-Beziehung beschrieben. Der Kantentyp ist ebenfalls über ein Label definiert und charakterisiert die Art der Abhängigkeit zwischen den Knoten. Auf Grundlage dieser Darstellungsform lässt sich eine Vielzahl von Problemstellungen in eine Graphenform überführen. [78, 130, 131]

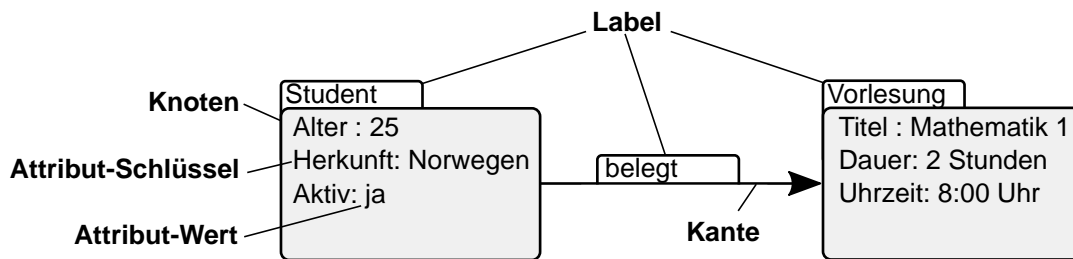


Abbildung 4.7: Exemplarischer Aufbau eines Property-Graphen

Eine Möglichkeit zur mathematischen Darstellung von Property-Graphen ist in Form eines Tupel. Durch die Tupelform werden graphentheoretische Problemstellung mit einer Vielzahl von Informationen in eine mathematische Beschreibung überführt und verarbeitet. Somit lassen sich auch komplexe Fragestellungen mit stark vernetzten Informationen softwaretechnisch abbilden. Ein Property-Graph kann beschrieben werden durch:

$$G = (V, E, S, T, \lambda_V, \lambda_E, \mu, \emptyset) \quad \text{mit}$$

$V$	einer Menge von Knoten
$E \subseteq V \times V \times L$	einer Menge von Kanten
$S$	einer Menge an Attribut-Schlüsseln
$T$	einer Menge an Attribut-Werten
$\lambda_V : V \rightarrow L$	einer Knoten-Beschriftung
$\lambda_E : E \rightarrow L$	einer Kanten-Beschriftung mit $\lambda_E(v_1, v_2, l) = l$
$\mu : (V \cup E) \times S \rightarrow (T \cup \{\emptyset\})$	einer Schlüssel-Wert-Zuordnung mit $\mu(o, s) = \emptyset$ , genau dann, wenn $o$ keine Attribut $s$ besitzt

und einer Menge von Labels  $L$ . Hier handelt es sich um eine allgemeine Darstellung, die an spezifische Datenbankformate angepasst werden kann. Nachdem die Grundlagen der Graphentheorie beschrieben und die vorhandenen Analyseansätze der Graphentheorie und Strukturen zur Abbildung von Graphen beschrieben sind, gilt es nun im nächsten Abschnitt die Anwendungspotenziale für die Erweiterung der Wechselwirkungsanalyse zu untersuchen und so die Ausgangsbasis für die spätere Entwicklung des Methodenansatzes zu schaffen.

## 4.4 Potenziale der Graphentheorie für die strategische Technologieplanung

Im Rahmen der Konkretisierung der Zielstellung (vgl. Abschnitt 3.6) wird die Kombination von Wechselwirkungsanalyse und Technologieroadmapping als geeigneter Ansatz zur Unterstützung der strategischen Technologieplanung identifiziert. Hierzu bedarf es jedoch einer Erweiterung der Wechselwirkungsanalyse durch die Graphentheorie. Wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, ist es das Ziel der Wechselwirkungsanalyse, den Zusammenhang zwischen verschiedenen Ereignissen oder Projekten zu beschreiben und zu analysieren, um Abhängigkeiten sichtbar zu machen und die Elemente entsprechend ihrer Dominanz zu priorisieren. Die Beschreibung der Zusammenhänge erfolgt in Form einer Verflechtungsmatrix, welche die Abhängigkeiten der Ereignisse oder Projekte semi-quantitativ darstellt (vgl. Abbildung 3.11). Diese Verflechtungsmatrix ist mit der Adjazenzmatrix in der Graphentheorie (vgl. Abschnitt 4.1) vergleichbar und zeigt Analogien zwischen Wechselwirkungsanalyse und Graphentheorie. Die Wechselwirkungsanalyse ist als ein gerichteter Graph zu interpretieren, in dem die Projekte oder Ereignisse als Knoten dargestellt und Abhängigkeiten zwischen zwei Elementen durch gerichtete Kanten repräsentiert werden. Neben der Darstellung als Adjazenzmatrix lässt sich die Verflechtungsmatrix auch in eine Inzidenzmatrix überführen. Diese bietet die Möglichkeit, insbesondere komplexe Fragestellungen mit einer großen Anzahl von Elementen in übersichtlicher Form darzustellen.

Durch die Möglichkeit, eine Wechselwirkungsanalyse als graphentheoretische Problemstellung auszudrücken, ergibt sich auch das Potenzial, bekannte Analyse- und Darstellungsansätze der Graphentheorie zu nutzen. In der Wechselwirkungsanalyse wird durch die Bildung der Aktiv- bzw. Passivsumme in der Verflechtungsmatrix die Dominanz bzw. Abhängigkeit der Elemente beschrieben. Elemente, die in der Verflechtungsmatrix eine hohe Aktivsumme besitzen, haben eine hohe Dominanz, beeinflussen also die anderen Elemente des Portfolios stark. Hingegen sind Elemente mit einer hohen Passivsumme als abhängig zu bezeichnen und werden folglich stark durch die anderen Elemente des Portfolios beeinflusst [157]. In der Graphentheorie werden diese Kennwerte durch den Eingangsgrad  $d_G^-$  und den Ausgangsgrad  $d_G^+$  beschrieben. Der Eingangsgrad eines Knotens gibt die Stärke der Beeinflussung durch andere Elemente an, der Ausgangsgrad entsprechend die aktive Beeinflussung anderer Elemente. Um die Stärke von Abhängigkeiten quantitativ auszudrücken, kann weiterhin die Darstellungsform eines gewichteten Graphen gewählt werden. Hierbei entspricht die Stärke der Gewichtung dem Kantengewicht  $w$  und es kann zwischen gewichtetem und ungewichtetem Knotengrad unterschieden werden. Entsprechend der Graphentheorie lassen sich Hubs und Authorities identifizieren, also Elemente, die eine im Vergleich mit den restlichen Elementen hohe Dominanz oder Abhängigkeit aufweisen und besondere Bedeutung in der Wechselwirkungsanalyse besitzen (vgl. Abschnitt 3.4). Auch das graphentheoretische Konzept der Communities lässt sich auf die Wechselwirkungsanalyse übertragen. Durch den von MÖHRLE entwickelten Ansatz wird gezeigt, wie die Projektportfoliomethode durch Methoden der Graphentheorie erweitert werden kann (vgl. Abschnitt 3.4.2). Insbesondere wird hier das Konzept der Communities, also Teilgraphen mit starker interner Vernetzung, angewendet. Der Ansatz ist jedoch auf die eindimensionale Bewertung anhand qualitativer Kenngrößen innerhalb von Projektklustern beschränkt.

Die Beschreibung einer Wechselwirkungsanalyse in Form eines dynamischen Graphen eröffnet die Möglichkeit, zeitliche Entwicklungsverläufe innerhalb des Wechselwirkungsportfolios abzubilden. So können beispielsweise Abhängigkeiten oder Ereignisse bzw. Projekte zeitliche Gültigkeitsbereiche besitzen. Hieraus resultiert, dass die Knotengrade nicht mehr als statische,

sondern als dynamische Werte zu betrachten sind und die Dominanz und Abhängigkeit von Ereignissen oder Projekten über den Zeitverlauf variieren. Dieser Ansatz kann, insbesondere vor dem Hintergrund dynamischer Entwicklungsprozesse und stetig variierender Marktentwicklungen, von hoher Relevanz für die Anwendung in der strategischen Technologieplanung sein. Auch können Knotenattribute als dynamische Kennwerte definiert werden, um beispielsweise Entwicklungsverläufe innerhalb der Projekte darzustellen.

Eine weitere Möglichkeit, Ansätze der Graphentheorie auf die Wechselwirkungsanalyse zu übertragen, ergibt sich in der Identifikation von Wegen in einem Abhängigkeitsnetzwerk. Durch die Analyse der Adjazenzmatrix und die Bildung von Aktiv- und Passivsummen lassen sich nur direkte Abhängigkeiten zwischen den Ereignissen bzw. Projekten identifizieren. Eine indirekte Abhängigkeit zwischen zwei Elementen, die keine direkte Abhängigkeit besitzen, jedoch über ein drittes Element miteinander in Abhängigkeit stehen, lassen sich nur schwer identifizieren. Hier kann das graphentheoretische Konzept der Wege (vgl. Abschnitt 4.1) verwendet werden. Durch den Einsatz der Breiten- oder Tiefensuche wird die Existenz eines Weges zwischen zwei Knoten des Graphen untersucht und eine Aussage über die Abhängigkeit zwischen den Elementen getroffen. Die Anzahl der durchlaufenen Kanten repräsentiert auch die Unmittelbarkeit der Abhängigkeit. Je weniger Kanten durchlaufen werden, desto direkter ist die Abhängigkeit.

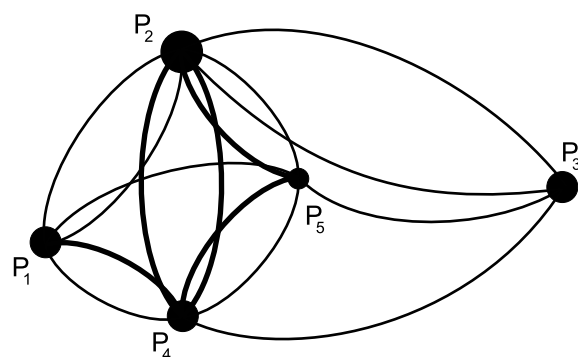
Auch für die Visualisierung von Abhängigkeitsnetzwerken können die Verfahren der Graphentheorie Anwendung finden. Kräftebasierte Layoutverfahren, wie sie zumeist für die Darstellung komplexer Netzwerke zum Einsatz kommen (vgl. Abschnitt 4.1), können auch für die Darstellung von Wechselwirkungsanalysen genutzt werden. Diese Form der Darstellung bietet in erster Linie Vorteile für die Abbildung komplexer Abhängigkeitsnetzwerke mit einer großen Anzahl an Elementen, in denen die reine Analyse der Adjazenzmatrix keine ausreichende Informationsbasis bietet. Über die Darstellung kann beispielsweise die Identifikation von Communities erfolgen, die einen Teilgraphen mit Elementen großer Abhängigkeiten repräsentieren. Durch kräftebasierte Verfahren erfahren Elemente mit hoher Abhängigkeit in der Darstellung eine große Anziehung und werden in unmittelbarer Nähe zueinander dargestellt. Zur Verdeutlichung dieses Zusammenhangs ist das Beispiel der Wechselwirkungsanalyse aus Abschnitt 3.4 mit einem kräftebasierten Layoutverfahren in Abbildung 4.8 dargestellt. Aus der Abbildung ist erkennbar, dass Projekt 3 aufgrund des vergleichsweise geringen Knotengrads eine isolierte Position innerhalb des Graphen besitzt und nahezu eigenständig betrachtet werden kann. [81, 157]

		Projekte				
		P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>
Projekte	P <sub>1</sub>	■	+	○	++	+
	P <sub>2</sub>	+	■	+	++	+
	P <sub>3</sub>	○	+	■	+	+
	P <sub>4</sub>	+	++	○	■	++
	P <sub>5</sub>	○	++	○	+	■

○ keine Abhängigkeit + geringe Abhängigkeit

++ starke Abhängigkeit

(a) Verflechtungsmatrix



(b) Kräftebasierte Darstellung der Abhängigkeiten

**Abbildung 4.8:** Wechselwirkungsanalyse mit kräftebasierten Layoutverfahren

An dieser Stelle ist herauszustellen, dass in der Wechselwirkungsanalyse klassischerweise nur Elemente miteinander in Beziehung gesetzt werden, die auf einer Hierarchiestufe stehen und vergleichbar sind. So werden beispielsweise nur Projekte mit anderen Projekten in Beziehung gesetzt. Im Rahmen des Technologieroadmappings wird hingegen die zeitliche Abhängigkeit von Märkten, Produkten, Technologien und Ressourcen zueinander beschrieben (vgl. Abbildung 3.10). Somit findet im Technologieroadmapping eine hierarchische Strukturierung der Problemstellung über mehrere Ebenen statt. Für die Entwicklung eines integrativen Methodenansatzes muss diese hierarchische Strukturierung auch auf die Wechselwirkungsanalyse übertragen werden, um die Problemstellung geeignet abbilden zu können.

## 4.5 Zusammenfassung

Die Kombination von Wechselwirkungsanalyse und Technologieroadmapping bietet die Möglichkeit, einen integrativen Ansatz zur Unterstützung der strategischen Technologieplanung für komplexe Technologiefelder wie ASR zu schaffen. Die Wechselwirkungsanalyse muss jedoch durch geeignete Ansätze der Graphentheorie erweitert werden, um die gesetzten Anforderungen aus Kapitel 2 zu erfüllen. Die Herausforderung liegt in der Schaffung eines systematischen Vorgehens, das implizites Wissen in einen strukturierten Bewertungsprozess überführt.

Ansätze zur Abhängigkeitsanalyse durch Betrachtung von Knoteneingangs- und Knotenausgangsgrad in der Mikroanalyse von Graphen versprechen hohes Transferpotenzial für einen Methodenansatz im Bereich der strategischen Technologieplanung. Die Bestimmung von Communities und Cliques in der Mesoanalyse von Graphen ermöglicht es, Themencluster zu identifizieren oder isolierte Projekte zu bestimmen. Durch die Makroanalyse lassen sich geeignete Ansätze zum Vergleich verschiedener Technologiefelder bilden. Mit dem Ansatz des Property-Graphen steht ferner ein geeignetes Modell zur Abbildung qualitativer und quantitativer Daten in Graphen zur Verfügung. Kräftebasierte Layoutverfahren stellen geeignete Mechanismen dar, um Graphen und deren Informationsgehalt anschaulich zu repräsentieren und zu interpretieren.

Um der Zielstellung dieser Arbeit (vgl. Abschnitt 3.6) gerecht zu werden und einen integrativen Ansatz zu schaffen, müssen die bestehenden Prinzipien der Graphentheorie angepasst und auf die Wechselwirkungsanalyse transferiert werden. Es gilt, auf Grundlage der Ansätze zur Mikro-, Makro- und Mesoanalyse geeignete Verfahren zu entwickeln, um die Komplexität von Technologieentwicklungsprojekten in einer Graphenstruktur abzubilden und dynamische Änderungsprozesse zu implementieren. Ferner muss eine geeignete Schnittstelle zum Technologieroadmapping geschaffen werden, um die Ergebnisse aus der Wechselwirkungsanalyse adäquat in die strategischen Planungsprozesse zu integrieren.



## 5 Entwicklung eines Methodenansatzes

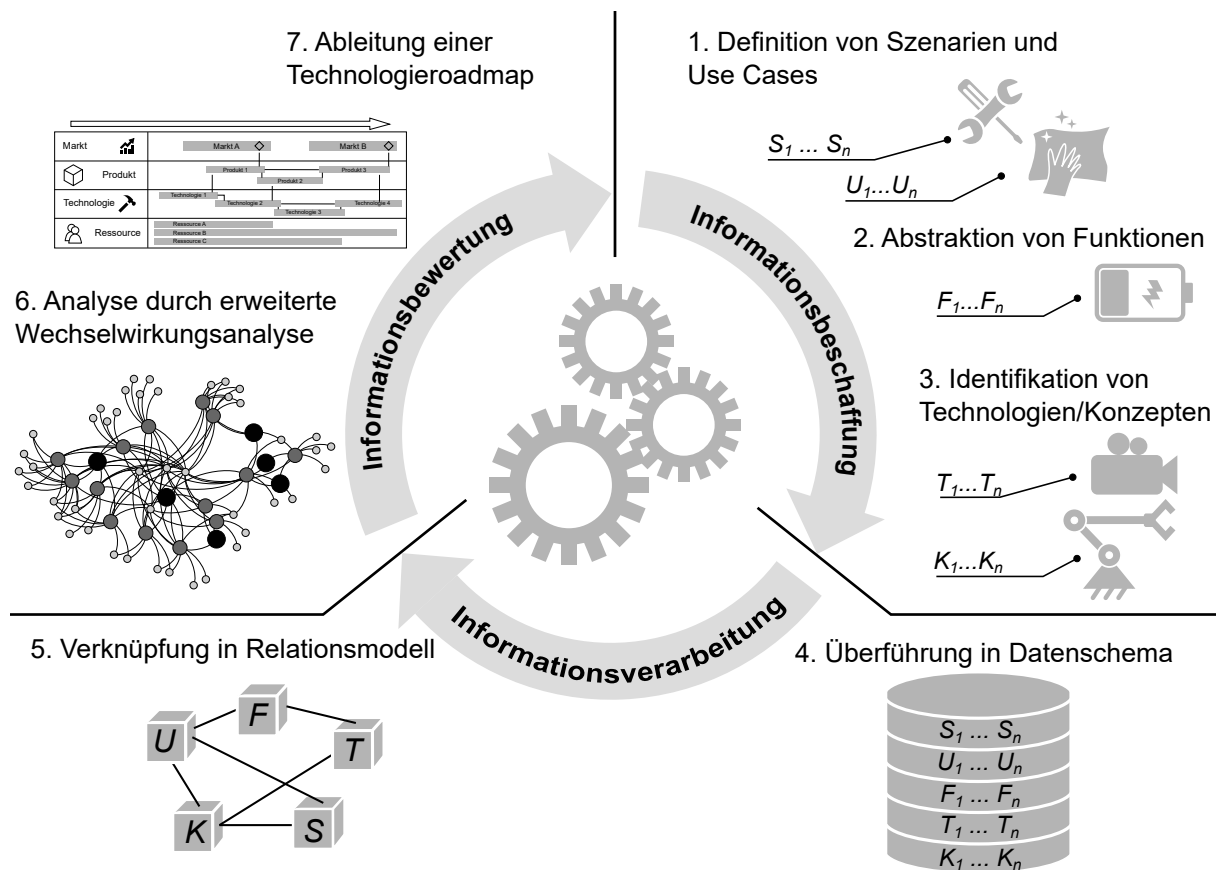
Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung eines integrativen Methodenansatzes aus Wechselwirkungsanalyse und Technologieroadmapping, unter Anwendung angepasster Ansätze der Graphentheorie, um die strategische Technologieplanung für Technologiefelder wie Automotive Service Robotics in den frühen Phasen ihrer Entstehung zu unterstützen. Hierzu werden in den vorherigen Kapiteln die methodischen Grundlagen dargestellt und insbesondere die Potenziale der Graphentheorie zur Erweiterung der Wechselwirkungsanalyse identifiziert.

In diesem Kapitel wird durch die Erweiterung der Wechselwirkungsanalyse und die Integration in das Technologieroadmapping ein eigener Ansatz entwickelt. Der entwickelte Ansatz wird im Rahmen von Abschnitt 5.1 zunächst in Gänze vorgestellt, um einen Überblick über seinen Aufbau zu erhalten. Im Anschluss werden die einzelnen Phasen der Informationsbeschaffung, Informationsverarbeitung und Informationsbewertung detailliert beleuchtet und anhand von Beispielen beschrieben.

### 5.1 Grundlegender Aufbau des Methodenansatzes

In Abbildung 5.1 ist eine Übersicht über den Methodenansatz dargestellt. Der Ansatz gliedert sich in die drei Phasen: Die Informationsbeschaffung, die Informationsverarbeitung und die Informationsbewertung. Die Zielstellung der *Informationsbeschaffungsphase* ist es, das zu untersuchende Technologiefeld zu analysieren und relevante Informationen zu seiner Beschreibung zusammenzutragen, um eine Informationsbasis für die Bewertung zu schaffen. Relevante Informationen können zum Beispiel der Einsatzzeitpunkt oder der Reifegrad (vgl. Abschnitt 3.1.1) einer Technologie sein. Die Phase der Informationsbeschaffung lässt sich in drei Schritte unterteilen.

Zunächst gilt es, Marktbedarfe und Kundenanforderungen zu beschreiben, die an das Technologiefeld gestellt werden. Dies erfolgt durch die Definition von sogenannten *Szenarien* und *Use Cases*. Szenarien zielen darauf ab, die Einsatzbereiche zukünftiger Produkte oder Applikationen allgemeingültig zu beschreiben. Die Beschreibung von Szenarien ist angelehnt an die Methodik der Szenariotechnik (vgl. Abschnitt 3.4). Hierbei werden die resultierenden Anforderungen an eine zukünftige Applikation und ein Produkt definiert sowie die äußeren Randbedingungen beschrieben. Die Beschreibungsform von Use Cases ist angelehnt an die in der Informatik verbreitete Darstellung von Anwendungsfällen. Use Cases dokumentieren die geplanten oder bestehenden Funktionalitäten eines Systems in der Anwendung durch einen Nutzer. Hierbei wird eine Black-Box-Darstellung verwendet und das von außen sichtbare Verhalten des Systems beschrieben. Die Beschreibung ist losgelöst von einer technischen Ausführung und ergebnisoffen. Im zweiten Schritt werden die identifizierten Use Cases abstrahiert und in eine Funktionsbeschreibung überführt, um eine Technologiezuordnung zu ermöglichen. Die Funktionsbeschreibung wird durch den Ansatz der allgemeinen Funktionsstrukturen aus der Konstruktionsmethodik unterstützt [138]. Den dritten Schritt bilden die Identifikation geeigneter Technologien zur Umsetzung der geforderten Funktionen und die Recherche bereits bestehender Konzepte und Produkte, die den Anforderungen entsprechen.



**Abbildung 5.1:** Übersicht über den eigenen Methodenansatz

Die *Informationsverarbeitungsphase* fokussiert die Strukturierung, Anreicherung und Verdichtung der gesammelten Informationen. Hierbei werden die gesammelten Informationen zunächst in fünf verschiedenen Informationsklassen abgebildet, die über klassenspezifische Attribute beschrieben werden. Es wird zwischen den Klassen Szenario, Use Case, Funktion, Technologie und Konzept unterschieden. Die Attribute bilden qualitative und quantitative Kenngrößen ab und dienen der Beschreibung der Klasselemente. Durch die Verwendung eines einheitlichen Datenschemas wird die Übertragbarkeit und Vergleichbarkeit der Informationen innerhalb des Methodenansatzes ermöglicht. Die Abbildung der gesammelten Informationen in das Datenschema basiert auf dem Aufbau eines Property-Graphen (vgl. Abschnitt 4.3), um die Informationen im nächsten Schritt mithilfe des Relationsmodells in eine Graphendarstellung überführen zu können. Jedes Klasselement stellt einen Knoten des Graphen dar.

Das Relationsmodell definiert die Abhängigkeiten zwischen den Elementen und folgt einem hierarchischen Aufbau. Jede Klasse ist einer Hierarchieebene zugeordnet, die nur mit bestimmten Klassen anderer Hierarchieebenen verknüpft werden kann. So werden z. B. Technologien ausschließlich mit Funktionen und Konzepten verknüpft, jedoch besteht keine direkte Relation zu den Use Cases. Durch das Relationsmodell wird das analysierte Technologiefeld in eine vollständige Graphendarstellung mit hierarchischer Struktur, den sogenannten *Technologiefeldgraphen* (TFG) überführt. Der TFG vernetzt die in der Informationsbeschaffungsphase gesammelten Daten in einem Property-Graphen (vgl. Abschnitt 4.3). Dieser Property-Graph bildet die Grundlage für die systematische Analyse des Technologiefelds mit Hilfe graphentheoretischer Ansätze (vgl. Ab-

schnitt 4.2). Die einzelnen Elemente des Technologiefelds werden hierzu über die Klassen der Szenarien, Use Cases, Funktionen, Technologien und Konzepte in individuelle Knotenelemente überführt. Die gegenseitigen Abhängigkeiten werden über Kanten modelliert. Durch die dynamische Verknüpfung von technologischen Potenzialen mit Marktbedürfnissen besteht die Möglichkeit, Technologieprojekte systematisch zu priorisieren. Mathematische Layoutverfahren ermöglichen zudem die Bildung von Projektbündeln. Ferner kann eine visuelle Beschreibung des Technologiefelds erfolgen (vgl. Abschnitt 4.4). Der TFG stellt das zentrale Element des Methodenansatzes dar.

Die *Informationsbewertungsphase* bildet die letzte Phase des Methodenansatzes. In dieser Phase werden die gesammelten und verknüpften Informationen durch Ansätze der Graphentheorie untersucht. Auf den fünf Hierarchieebenen des TFG werden unterschiedliche Fragestellungen verfolgt. Es kann zwischen der Relevanzabschätzung, der Bestimmung des Handlungsbedarfs und der Priorisierung von zukünftigen Entwicklungsaktivitäten unterschieden werden. Bei der Relevanzabschätzung wird die Bedeutung einzelner Technologien oder Funktionen auf Grundlage identifizierter Abhängigkeiten für das Technologiefeld untersucht. Somit kann eine Aussage darüber getroffen werden, welche Bedeutung einer Technologie oder einer Funktion in der Bearbeitung des Technologiefelds zuzuschreiben ist. Im Rahmen der Bestimmung des Handlungsbedarfs werden die Anforderungen der Szenarien mit den Eigenschaften der über das Relationsmodell verknüpften Technologien abgeglichen. Auf dieser Grundlage kann zum einen die Realisierbarkeit der Szenarien abgeschätzt werden. Zum anderen kann bei einer Nichterfüllung der Anforderungen auch ein entsprechender Handlungsbedarf auf Ebene der Technologien abgeleitet werden. Aufgrund der frühen Phase, für die der Methodenansatz ausgerichtet ist, und der Fokussierung auf die strategische Technologieplanung, ist die Bewertung auf Grundlage von qualitativen oder semi-quantitativen Kenngrößen möglich (vgl. Abschnitt 3.6). Die Ableitung des Handlungsbedarfs bildet in Kombination mit der Relevanzabschätzung die Grundlage für die Priorisierung zukünftiger Entwicklungsaktivitäten. Durch die Kombination dieser beiden Kenngrößen kann eine Aussage darüber getroffen werden, welche Anforderungen an die Technologieentwicklung aus welchem Szenario resultieren.

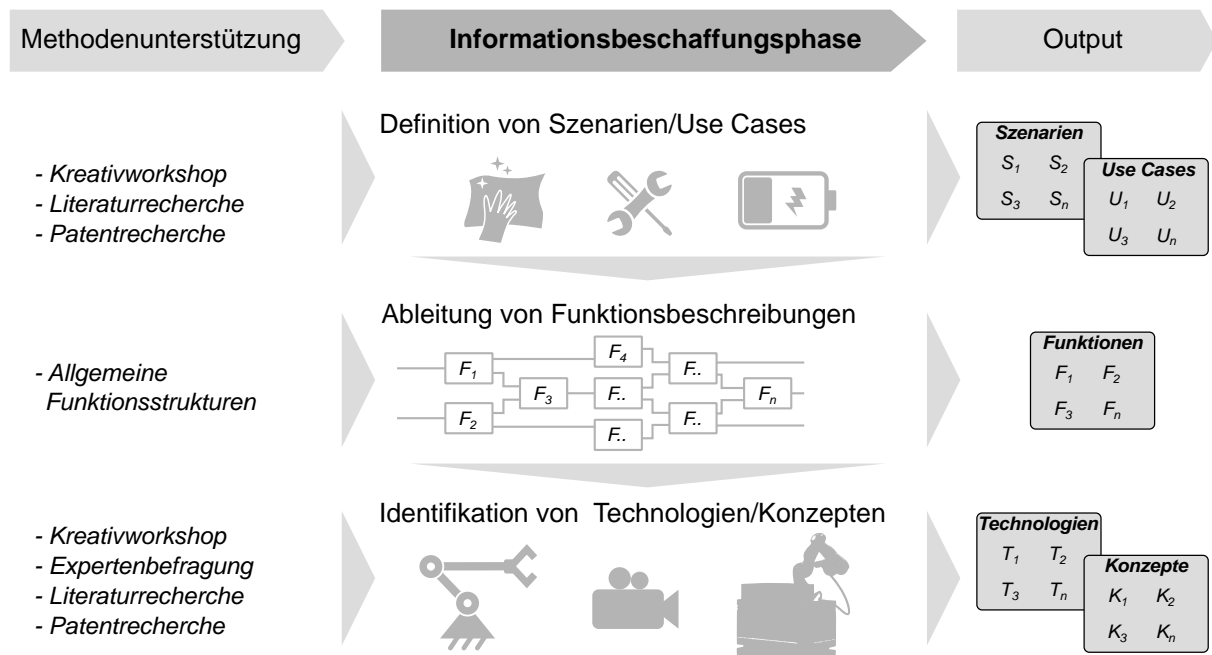
Als Ergebnis der Informationsbewertungsphase sind Abhängigkeiten zwischen den Elementen des TFG bekannt und bewertet. Für die Ergebnisdarstellung wird im letzten Schritt die Form einer Technologieroadmap genutzt (vgl. Abbildung 3.10). Zusätzlich ermöglicht es der TFG, für die individuellen Knoten des Graphen einen Steckbrief zu erstellen, der klassenspezifische Informationen enthält. Auf Grundlage dieser Steckbriefe kann beispielsweise die Technologieauswahl erfolgen oder die Konzeptentwicklung unterstützt werden. Nachdem die Informationsbewertungsphase abgeschlossen ist, kann der Methodenansatz erneut durchlaufen werden. Dies hat zum Ziel, die Informationsbasis ständig zu ergänzen und auf einem aktuellen Stand zu halten. Die Identifikation neuer Szenarien, Use Cases oder Technologien kann über eine Erweiterung der Datenbasis und die Einbindung in das Relationsmodell in die Bewertung einbezogen werden. Somit wird auch der Anspruch nach einer dynamischen Überarbeitung erfüllt (vgl. Abschnitt 3.6). Nachdem ein Überblick über den Methodensatz gegeben wurde, werden in den folgenden Abschnitten die einzelnen Phasen detailliert beschrieben und anhand von ausgewählten Beispielen aus dem Technologiefeld ASR veranschaulicht.



## 5.2 Informationsbeschaffungsphase

Die Informationsbeschaffungsphase ist in drei Unterschritte aufgeteilt. Zu Beginn werden über Szenarien und Use Cases die potenziellen Einsatzmöglichkeiten für Produkte und Applikationen beschrieben. Für das Technologiefeld ASR können beispielsweise die infrastrukturellen Randbedingungen der Applikation beschrieben werden. Im Anschluss werden die Use Cases in eine Funktionsbeschreibung abstrahiert, um eine lösungsneutrale Beschreibungsform zu erhalten. Den Abschluss bildet zum einen die Bestimmung potenziell umsetzungsrelevanter Technologien auf Grundlage der Funktionsbeschreibungen. Zum anderen werden bereits bestehende Konzepte oder Produkte zur Umsetzung der Szenarien und Use Cases identifiziert.

In Abbildung 5.2 ist der Ablauf der Informationsbeschaffungsphase schematisch dargestellt. Mit der in der Informationsbeschaffungsphase verfolgten Dreiteilung wird die Anforderung nach Berücksichtigung von Market-Pull- und Technology-Push-Ansätzen adressiert (vgl. Abschnitt 2.4.1). Auf der einen Seite werden Kundenbedarfe in Form von Szenarien und Use Cases definiert.



**Abbildung 5.2:** Ablauf der Informationsbeschaffungsphase

Auf der anderen Seite werden durch die Bestimmung von geeigneten Technologien und bestehenden Konzepten die technologischen Potenziale identifiziert. Über das Relationsmodell werden später die kundenseitigen Bedarfe mit den technologischen Potenzialen über den Zwischenschritt der Funktionen verknüpft und so Market-Pull- und Technology-Push-Ansätze synchronisiert. Im Folgenden werden die zuvor beschriebenen Unterschritte der Informationsbeschaffungsphase im Detail beschrieben.

### 5.2.1 Szenarien und Use Cases


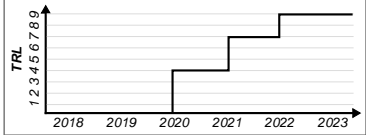
Den Ausgangspunkt des entwickelten Methodenansatzes bildet die Beschreibung der *Szenarien* und *Use Cases*. Die Erstellung von Szenarien und Use Cases erfolgt durch ein zweistufiges Verfahren, das aus einem interdisziplinären Kreativworkshop mit potenziellen Kundengruppen und einer Markt- bzw. Literaturrecherche besteht. Durch diesen zweistufigen Ansatz können unternehmensinterne und -externe Informationsquellen berücksichtigt werden.

Im Rahmen des Kreativworkshops werden durch die relevanten Stakeholder marktseitige Erwartungen an das Technologiefeld und Ideen für neue Produkte oder Applikationen identifiziert und in Form von Szenarien und Use Cases beschrieben. Der Vorteil dieses workshopbasierten Vorgehens ist, dass die marktseitigen Anforderungen der Stakeholder in einer frühen Phase synchronisiert werden und eine konsistente Anforderungsbasis für das Technologiefeld besteht. Potenzielle Teilnehmer dieses Kreativworkshops sind die Bereiche Marketing und Vertrieb, in Abhängigkeit des Technologiefelds können aber auch weitere Personenkreise berücksichtigt werden. Im Fall des Technologiefelds ASR können beispielsweise die Betreiber von Mobilitätssystemen oder Flottenkunden in die Erstellung von Szenarien und Use Cases eingebunden werden. In Ergänzung werden durch eine Markt- bzw. Literaturrecherche unternehmensexterne Entwicklungen und Ideenansätze betrachtet. Am Beispiel des Technologiefelds ASR liefert z. B. die Recherche von Reparaturleitfäden und Wartungsanweisungen weitere Szenarien und Use Cases für den Einsatz von Automatisierungstechnik.

In der Informationsbeschaffungsphase ist zu berücksichtigen, dass die identifizierten Szenarien und Use Cases sowohl mit der übergeordneten Unternehmens- als auch der Technologiestrategie des Unternehmens in Zusammenhang stehen müssen (vgl. Abschnitt 3.3.2). Dies ist erforderlich, um eine Synchronisierung mit anderen Technologiefeldern zu erzielen und die Definition der Anforderungen an das Technologiefeld mit den Inhalten der Unternehmensstrategie abzugleichen.

**Szenarien** Über die Definition von Szenarien werden zukünftige Einsatzbereiche und deren Randbedingungen für Applikationen oder Produkte beschrieben. Die Beschreibung der Szenarien orientiert sich an den Ansätzen der Szenariotechnik (vgl. Abschnitt 3.4.1) und bildet exogene Einflüsse technischer und nicht-technischer Art auf die Applikation ab. Die Dokumentation erfolgt in Form eines standardisierten *Szenariosteckbriefs*. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die definierten Szenarien vergleichbar und relevante Kenngrößen für die spätere Informationsbewertungsphase beschrieben sind. Am Beispiel des in Abbildung 5.3 dargestellten Steckbriefs für das Szenario „Automatisiertes Parken und Laden von Elektrofahrzeugen in öffentlichen Parkhäusern“ soll der Aufbau beschrieben werden.

Über den Titel wird dem Szenario eine eindeutige Beschreibung zugeordnet. Ebenso wird für jedes Szenario eine eindeutige ID vergeben, die für die spätere Verarbeitung im Rahmen des Relationsmodells verwendet wird. Durch die textuelle Beschreibung wird der Inhalt des Szenarios spezifiziert und möglichst anschaulich dargestellt. Unterstützt wird diese Beschreibung durch eine Skizze oder eine Abbildung, mit der die Idee hinter dem Szenario visuell aufbereitet wird. Dieser Bereich des Steckbriefs dient dem allgemeinen Verständnis. Um für eine spätere Konkretisierung oder im Rahmen der späteren Technologieentwicklung einen Ansprechpartner zu haben, wird der Ersteller ebenfalls dokumentiert.

Titel des Szenario		ID: S <sub>1</sub>
Automatisiertes Parken und Laden von Elektrofahrzeugen in öffentlichen Parkhäusern		
<b>Skizze/Abbildung</b> 	<b>Geforderter Reifegrad (über Zeitverlauf)</b> 	
<b>Beschreibung des Szenarios</b> <p>In einem öffentlichen Parkhaus sollen Elektrofahrzeuge, die über eine automatisierte Fahrfunktion verfügen, automatisiert geladen werden. Es soll auf die standardisierte Ladeinfrastruktur zurückgegriffen werden und ein möglichst minimaler Eingriff in die Infrastruktur des Parkhaus vorgenommen werden. In dem Szenario sollen Fahrzeuge unterschiedlicher Marken bedient werden, um die Auslastung der Ladeinfrastruktur zu maximieren. Eine Integration in das Parkhausleitsystem ist vorzusehen. Im Parkhaus wird ein Mischbetrieb aus manuell und automatisiert fahrenden Fahrzeugen vorherrschen. Die Personensicherheit ist zu gewährleisten.</p>		
<b>Szenariorelevanz</b> gering <input checked="" type="radio"/> mittel <input type="radio"/> hoch <input type="radio"/>		
<b>Allgemeine Randbedingungen</b> Endkunde: Privatperson Zielregion: Europa Zielfahrzeug: alle Typen el. PKW Umfeld: Öffentlicher Raum		
<b>Technische Randbedingungen</b> Temperaturbereich: -10°C – 40°C IP-Schutzklasse: IP 54 Maximalgewicht: 2,5 t		
<b>Wirtschaftliche Randbedingungen</b> Fahrzeugdurchsatz: 10 Fzg./Tag Preisbereitschaft Kunde: 15 € pro Ladevorgang max. Kosten für Infrastruktur: 250.000 € Geschäftsmodell: Einpreisung in Kosten für Ladevorgang		
<b>Ersteller</b> Stephan Herold		

**Abbildung 5.3:** Steckbrief für ein Szenario (Inhalte beispielhaft)

Durch die Definition eines geforderten Szenarioreifegrads  $TRL_{\text{gef}}$  wird festgelegt, welchen Funktionsumfang ein Szenario zu welchem Zeitpunkt voraussetzt. Dies ist insbesondere für die Anwendung in Forschung und Entwicklung relevant, da hier auch Szenarien verfolgt werden, die nicht bis zu einer Serienreife gebracht werden sollen, sondern sich z. B. auf die Darstellung einer technischen Machbarkeit beschränken. Die Festlegung erfolgt in Form eines Diagramms, in dem der Reifegrad des Szenarios über den Zeitverlauf aufgetragen wird. Somit wird auch das Zieldatum für die Umsetzung des Szenarios implizit definiert.

Die Stufen des klassischen Technologiereifegradmodells der NASA (vgl. Abschnitt 3.1.1) werden an dieser Stelle angepasst und verallgemeinert, um die Anwendbarkeit des Konzepts auf weitere Technologiefelder, insbesondere auf das Feld ASR, zu ermöglichen. In Tabelle 5.1 ist die in dieser Arbeit verwendete Definition der Technologiereifegradstufen dargestellt. Die erste Reifegradstufe wird durch Grundlagenuntersuchungen gebildet, in der die prinzipielle Machbarkeit einer Funktion nachgewiesen wird. In der zweiten Reifegradstufe ist, aufbauend auf den untersuchten Grundlagen, bereits eine Konzeptbeschreibung vorhanden. Die dritte Reifegradphase wird durch den Aufbau eines Funktionsmodells, in dem die Funktionalitäten entworfener Konzepte nachgewiesen werden, definiert. Im Rahmen der Reifegradstufen 4 und 5 erfolgt die Erprobung dieses Funktionsaufbaus zunächst unter Laborbedingungen und später im Reallabor. Als Reallabor ist eine Umgebung zu verstehen, die dem späteren Serieneinsatz bzw. dem Szenario ähnelt, jedoch durch Randbedingungen wie gesetzliche Ausnahmegenehmigungen oder spezielle

Sicherheitskonzepte vereinfachte Einsatzbedingungen aufweist und so eine frühzeitige Erprobung zulässt [5, 147]. Hieran schließt sich in den Reifegradstufen 6 und 7 die Prototypenentwicklung an, in der ein seriennahes Konzept zunächst in einem Reallabor und anschließend im realen Umfeld erprobt wird. Hierbei werden erstmalig alle Einzelfunktionen in einem Gesamtsystem erprobt. Die abschließenden Reifegradstufen 8 und 9 umfassen die Entwicklung eines Vorserienprodukts in kleiner Stückzahl zur finalen Erprobung sowie die Finalisierung in Form eines Serienprodukts.

**Tabelle 5.1:** Technologiereifegrad nach eigener Definition, in Anlehnung an [100]

Technologiereifegrad	Beschreibung der Reifegradstufe
TRL 1	Grundlagenuntersuchung
TRL 2	Konzeptbeschreibung
TRL 3	Nachweis der Konzeptbeschreibung
TRL 4	Funktionsaufbau im Labor
TRL 5	Funktionsaufbau im Reallabor
TRL 6	Prototyp im Reallabor
TRL 7	Prototyp im realen Umfeld
TRL 8	Vorserienprodukt
TRL 9	Serienprodukt

Für jedes Szenario wird eine Relevanzbewertung vorgenommen, um im Rahmen der späteren Bewertungsphase eine Priorisierung von Technologieprojekten (vgl. Abschnitt 3.6) zu ermöglichen. Hierbei kann auf einer qualitativen Skala zwischen einer geringen, mittleren und hohen Relevanz gewählt werden. Mit der Bewertung soll eine Aussage darüber getroffen werden, welche Wichtigkeit das Szenario für das gesamte Technologiefeld hat. Diese Bewertung kann, angelehnt an die Technologiestrategie, die Ausrichtung des Technologiefelds bestimmen und die Prioritäten in der Bearbeitung festlegen.

Neben der qualitativen Beschreibung technologischer Szenarioanforderungen durch den Technologiereifegrad werden im Steckbrief auch weitere technische Randbedingungen, wie z. B. Temperaturbereiche oder IP-Schutzklassen, definiert. Da diese Kenngrößen jedoch szenariospezifisch sind und nicht allgemeingültig beschrieben werden können, erfolgt die Festlegung in Form einer Freitextfläche. Gleiches gilt für die Definition von allgemeinen Randbedingungen, die mit keiner technischen Kenngröße beschrieben werden können. Über eine weitere Freitextfläche kann z. B. definiert werden, welche Zielregion und Kundengruppe das Szenario adressiert. Die Beschreibung dieser allgemeinen Randbedingungen kann als Ergänzung zur Beschreibung des Szenarios genutzt werden.

Im letzten Abschnitt des Steckbriefs werden die wirtschaftlichen Randbedingungen beschrieben. Da diese wiederum spezifisch vom Szenario abhängen und nicht allgemeingültig definiert werden können, erfolgt die Abfrage über ein Freitextfeld, in dem Kennwerte, wie die erwartete Preisbereitschaft des Kunden oder die maximalen Investitionen für den Betreiber, beschrieben werden können. Für die definierten Szenarien werden im Rahmen des Kreativworkshops bzw. der Recherche ebenfalls die sogenannten Use Cases beschrieben.

**Use Cases** Durch die Beschreibung von Use Cases werden die geplanten oder bestehenden Funktionalitäten in der Anwendung und das von außen sichtbare Verhalten eines Systems oder Produkts beschrieben. Die Granularität der Beschreibung ist bewusst grob gewählt und losgelöst von einer technischen Ausführungsform, um lösungsneutral die Anwendung bzw. die Gesamtaufgabe zu beschreiben. Technische Randbedingungen oder Anforderungen sind ebenfalls nicht enthalten, da diese durch das Szenario definiert sind. Die Dokumentation erfolgt ebenfalls durch einen standardisierten Steckbrief. Am Beispiel „Automatisiertes Stecken von AC-Ladekabeln“ aus dem Technologiefeld ASR ist dieser in Abbildung 5.4 abgebildet. Der Steckbrief setzt sich aus einem Titel, einer Skizze bzw. Abbildung sowie einer Beschreibung, einer eindeutigen ID und dem Verfasser des Use Case zusammen. Der Titel beschreibt die Hauptaufgabe, die innerhalb des Use Case zu realisieren ist. Durch die Abbildung kann der Use Case visuell dokumentiert werden. Die Beschreibung fasst zusammen, was innerhalb des Use Case passiert und welche Zustände erreicht werden sollen. Außerdem bildet sie die Grundlage für die Erarbeitung der Funktionsbeschreibungen im nächsten Schritt der Informationsbeschaffungsphase.

Titel des Use Case		ID: U1
Titel des Use Case		ID: U1
Titel des Use Case		ID: U1
Automatisiertes Stecken von AC-Ladekabeln		
<b>Skizze/Abbildung</b> 	<b>Beschreibung des Use Case</b> <p>Um den Kundenkomfort zu erhöhen, soll ein AC-Kabel Typ 2 automatisiert in die vorhandene Ladeschnittstelle des Fahrzeugs gesteckt werden. Nach Beendigung des Ladevorgangs soll der Stecker automatisch aus dem Fahrzeug entfernt werden.</p>	
<b>Ersteller</b> Stephan Herold		

**Abbildung 5.4:** Steckbrief Use Case (Inhalte beispielhaft)

Durch die getrennte Beschreibung von Szenarien und Use Cases ist es möglich, eine breite Anzahl von potenziellen Anwendungsfällen und Produkten zu definieren und szenariospezifische Anforderungen von den Funktionsumfängen des Use Cases zu trennen. Ferner ermöglicht die neutrale Formulierung die Zuordnung von einem Use Case zu mehreren Szenarien im Rahmen des Relationsmodells und den Aufbau eines TFG. Vorzugsweise erfolgt die Erstellung von Szenarien und Use Cases in einem gemeinsamen Workshop, um eine Konsistenz der Szenario-Use Case-Zuordnung zu erreichen und das innerhalb des Workshops entstehende gemeinsame Verständnis der Teilnehmer für das Technologiefeld zu nutzen.

### 5.2.2 Funktionsbeschreibung

Das Ziel des Methodenansatzes ist es, die strategische Technologieplanung im dynamischen Unternehmensumfeld bei der Auswahl und Priorisierung von Technologien in der frühen Phase zu unterstützen. Hierzu sollen Technologien mit den Anforderungen potenzieller Einsatzszenarien abgeglichen und bestehende Defizite identifiziert werden. Es gilt, die relevanten Technologien

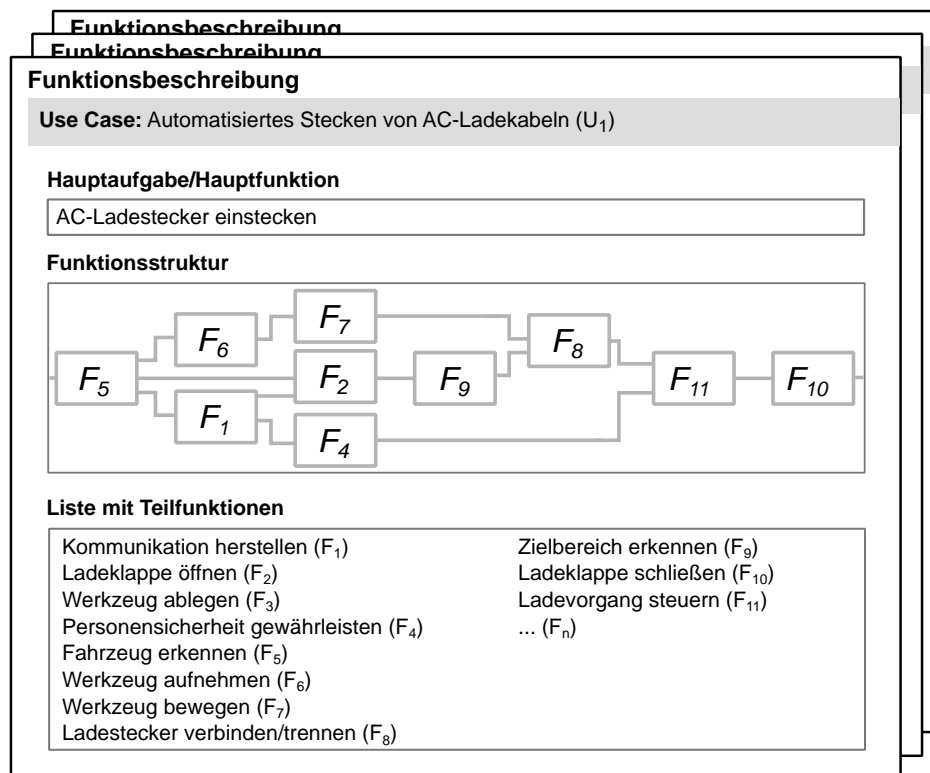
zu identifizieren, da nicht vorausgesetzt werden kann, dass dem Methodenanwender alle szenariorelevanten Technologien im Vorfeld bekannt sind. Als relevante Technologien gelten solche, die potenziell für den Einsatz innerhalb des Technologiefelds geeignet sind, um die Use Cases der Szenarien zu erfüllen. Da diese jedoch nicht intuitiv identifiziert werden können, bildet die Funktionsbeschreibung den zweiten Schritt der Informationsbeschaffungsphase. Um eine zielgerichtete Identifikation von Technologien zu ermöglichen, werden die zuvor beschriebenen Use Cases in eine lösungsneutrale Funktionsbeschreibung überführt und der Suchraum für potenziell relevante Technologien beherrschbar gemacht (vgl. Abschnitt 3.1.2). Auf Grundlage der Funktionsbeschreibungen wird eine strukturierte Technologieidentifikation ermöglicht und die Wiederholbarkeit sichergestellt.

An dieser Stelle kommt die Methode der allgemeinen Funktionsstrukturen zum Einsatz [44, 119, 138], um die Use Cases von einer allgemeingültigen Beschreibung in Form eines Steckbriefs in eine Funktionsbeschreibung zu überführen. Sie beschreiben den Zusammenhang zwischen dem Eingangs- und Ausgangszustand des Systems und leiten sich aus der Gesamtaufgabe, die im Rahmen des Use Case definiert wurde, ab. Aus der Gesamtaufgabe wird zunächst die Gesamtfunktion des Use Case bestimmt, welche im weiteren Verlauf schrittweise in seine Teilfunktionen zergliedert wird, um die Komplexität zu reduzieren [119]. Die Zergliederung von Haupt- in Teilfunktionen folgt einer hierarchischen Struktur.

Die Blockdarstellung beschreibt Teilfunktionen über energetische, stoffliche und informationstechnische Flüsse in einer Netzwerkdarstellung. Zur Bezeichnung der einzelnen Teilfunktionen werden eindeutige Substantiv-Verb-Kombination verwendet. Neben Gesamt- und Teilfunktionen kann zwischen sogenannten Haupt- und Nebenfunktionen unterschieden werden (vgl. Abschnitt 3.1.2). Hauptfunktionen beschreiben die primäre Aufgabe innerhalb des Use Cases, welcher durch die Nebenfunktionen unterstützt wird [153]. Bei der Formulierung der Teilfunktionen ist zu beachten, dass diese möglichst allgemeingültig ausgeführt sind [119]. Hierdurch wird es möglich, Teilfunktionen zwischen den identifizierten Use Cases zu übertragen und einen Funktionsbaukasten für die Definition von Use Cases zu bilden, einzelne Teilefunktionen mit verschiedenen Use Cases zu verknüpfen und einen TFG aufzubauen. Daher sollten bei der Bestimmung der Teilfunktionen auch immer die weiteren Use Cases des Technologiefelds berücksichtigt werden.

Die Erstellung der Funktionsbeschreibung kann direkt im Rahmen des Workshops zur Definition von Szenarien und Use Cases erfolgen. Allerdings ist die Überführung von einer Aufgabenbeschreibung in eine feingliedrige Funktionsstruktur zeitintensiv und setzt technisches sowie methodisches Vorwissen voraus. Aus diesem Grund erfolgt die Erstellung im Nachgang des Workshops durch einen Experten. Der Experte zeichnet sich dadurch aus, dass er einerseits Kenntnis über die Intention hinter dem Use Case hat und andererseits in der Lage ist, diese in eine technische Beschreibung und Einzelfunktionen zu untergliedern [153]. Idealerweise ist er an der Definition des Use Cases im Rahmen des Kreativworkshops beteiligt. Durch diesen Experten erfolgt idealerweise auch die Identifikation der relevanten Technologien sowie der bestehenden Konzepte, um das durch die Erarbeitung der Teilfunktionen entstandene Vorwissen nutzen zu können.

Um die Vorstellungen für einen Use Case adäquat abbilden zu können, ist eine regelmäßige Abstimmung zwischen dem Experten und den Workshopteilnehmern, die an der Erstellung des Use Case beteiligt waren, durchzuführen. Die Dokumentation der Funktionsbeschreibungen erfolgt ebenfalls auf einem Formblatt. Über die Bezeichnung wird die Funktionsbeschreibung



**Abbildung 5.5:** Steckbrief Funktionsbeschreibung (Inhalte beispielhaft)

einem spezifischen Use Case zugeordnet. Aufbauend auf der Hauptaufgabe bzw. Hauptfunktion ist die entsprechende Funktionsstruktur dargestellt. Der Detaillierungsgrad der Funktionsstruktur ist von der Komplexität der Hauptfunktion abhängig [119]. In der Funktionsstruktur bildet der bekannte netzwerkartige Aufbau den Zusammenhang zwischen einzelnen Teilfunktion auf Basis von Stoff-, Energie- und Informationsflüssen ab. Zusätzlich wird eine Listendarstellung mit den Teilfunktionen eines Use Case erstellt. Jeder Teilfunktion wird analog zur Bezeichnung der Szenarien und Use Cases auch eine eindeutige ID zugeordnet.

In Abbildung 5.5 ist dieses Formblatt exemplarisch für den zuvor beschriebenen Use Case „Automatisches Stecken von AC-Ladekabeln“ dargestellt. Nachdem die Teilfunktionen für die Use Cases des Technologiefelds definiert sind, ist der Suchraum für die Bestimmung relevanter Technologien und Konzepte im nächsten Schritt der Informationsbeschaffungsphase eingegrenzt.

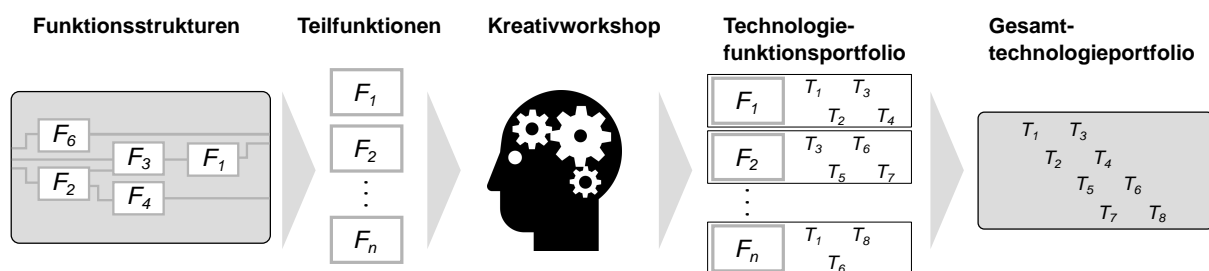
### 5.2.3 Technologien und Konzepte

Den Abschluss der Informationsbeschaffungsphase bildet die Identifikation relevanter Technologien und Konzepte. Dieser Abschnitt gliedert sich in einen Kreativworkshop mit Technologieexperten sowie eine Patent- und Literaturrecherche. Als Ergebnis werden die Technologien und Konzepte dokumentiert und für die Informationsverarbeitungsphase aufbereitet.

**Technologien** Durch einen Kreativworkshop werden die potenziell zur Umsetzung geeigneten Technologien identifiziert. Hierbei wird der Ansatz verfolgt, dass die Realisierung der Teilfunktionen durch den Einsatz geeigneter Technologien erfolgt (vgl. Abschnitt 3.1.2) und für alle Teilfunktionen (vgl. Abschnitt 5.2.2) ein Einzelportfolio an Technologien erstellt werden kann, das sogenannte *Technologiefunktionsportfolio*. Durch die Vereinigung aller Technologiefunktionsportfolios lässt sich das *Gesamttechnologieportfolio* bilden. Das Gesamttechnologieportfolio bildet die technologische Seite des TFG ab und enthält alle potenziell relevanten Technologien des Felds. Hierbei werden sowohl interne als auch externe Quellen einbezogen, um potenzielle Konkurrenzkonzepte in der späteren Phase der Informationsbewertung berücksichtigen zu können und den strategischen Charakter der Methode zu unterstützen. Durch den langfristigen Betrachtungszeitraum ist auch eine externe Technologiebeschaffung möglich.

Ob eine Technologie zur Umsetzung einer Teilfunktion geeignet ist, wird durch entsprechende Technologieexperten innerhalb des Workshops entschieden. Bei der Zuordnung der Technologien ist zu Berücksichtigen, dass keine implizite Vorgabe einer Gesamtlösung erfolgt, sondern die Realisierung der Teilfunktionen im Vordergrund steht. Die Zusammensetzung der Teilnehmer bei der Durchführung des Workshops ist an die Themenstellung anzupassen und aufgrund der Teilfunktionen zu definieren. Zusätzlich zu Technologieexperten können Teilnehmer des ersten Workshops in beratender Funktion hinzugezogen werden, um Rückfragen zu den Szenarien und Use Cases zu beantworten. Somit findet ein frühzeitiger Dialog zwischen den Autoren der Szenarien und Use Cases, die den Market-Pull repräsentieren, sowie den Technologieexperten, die Kenntnisse über die aktuellen Entwicklungen einfließen lassen und den Technology-Push vertreten, statt (vgl. Abschnitt 3.3.1).

Im Rahmen des Workshops werden die Teilfunktionen diskutiert und durch Unterstützung von Kreativitätstechniken, wie dem Brainstorming [44] oder der Walt-Disney-Methode [145], relevante Technologien benannt und in einem Technologiefunktionscluster gebündelt. Da die entwickelte Methode auf die strategische Technologieplanung ausgerichtet ist, findet an dieser Stelle keine Bewertung der Technologien statt. Es wird ausschließlich eine prinzipielle Eignung der Technologien zur Funktionsrealisierung vorausgesetzt. Der Ablauf der Technologieidentifikation ist in Abbildung 5.6 visualisiert.



**Abbildung 5.6:** Ablauf der Technologieidentifikation

Die Dokumentation der identifizierten Technologien erfolgt wie zuvor in Form eines standardisierten Steckbriefs. Dieser Steckbrief ist so aufgebaut, dass die technologischen, monetären und zeitlichen Bewertungsgrößen der Technologien in einem einheitlichen Format dokumentiert werden. In Abbildung 5.7 ist der Technologiesteckbrief am Beispiel „3D-LiDAR“ dargestellt [75, 99]. Im allgemeinen Teil des Steckbriefs sind die Bezeichnung der Technologie sowie eine eindeutige ID enthalten. Zur weiteren Veranschaulichung der Technologie für Dritte sind eine Skizze




bzw. eine Abbildung sowie eine textuelle Beschreibung vorgesehen. Über die Definition eines Technologieexperten wird weiterhin ein Ansprechpartner für eventuelle Rückfragen benannt. Im zweiten Abschnitt des Steckbriefs wird die zu erwartende Reifegradentwicklung  $TRL_{\text{real}}$  für die Technologie dokumentiert. Hierbei wird auf die im Rahmen der Szenarien definierte Abstufung zurückgegriffen (vgl. Tabelle 5.1). Die Dokumentation erfolgt analog über ein Diagramm, in dem die Reifegradentwicklung über den Zeitverlauf aufgetragen wird. Um die strategische Technologieauswahl unterstützen zu können und für die weitere Konzeptentwicklung eine Entscheidungsgrundlage zu bieten, wird weiterhin eine Klassifizierung der Technologie vorgenommen. Hierbei werden die Art der Technologie, die unternehmensinterne Technologiekompetenz, das zu erwartende Technologiepotenzial und die Lebenszyklusphase, in der sich die Technologie befindet, beschrieben. Ferner werden die technischen Leistungsparameter der Technologie in einem Freitextfeld dokumentiert. Ebenso werden die monetären Leistungsparameter der Technologie, wie der Preis oder das Verkaufsmodell, hinterlegt. Abschließend werden die Informationsquellen, die bei der Erstellung des Steckbriefs berücksichtigt wurden, festgehalten. Dies können beispielsweise wissenschaftliche Veröffentlichungen oder technische Datenblätter sein.

**Bezeichnung der Technologie**
ID: T<sub>1</sub>

**Bezeichnung der Technologie**  
 3D-LiDAR

**Skizze/Abbildung**



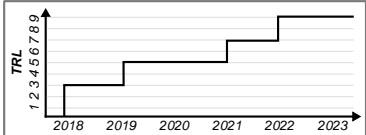
**Beschreibung der Technologie**

LiDAR ist ein optisches Messverfahren, mit dem Objekte in der näheren Umgebung lokalisiert und ihre Entfernung, Geschwindigkeit sowie Bewegungsrichtung bestimmt werden können. LiDAR steht für *Ligh Detection And Ranging*. Dabei sendet ein Laser in regelmäßigen Abständen Lichtpulse aus, die von den Objekten reflektiert werden. Das von der Oberfläche des Objekts zurückfallende Licht lässt Rückschlüsse auf die Position sowie Beschaffenheit zu. Die reflektierte Strahlung wird mit Fotodioden detektiert und elektronisch ausgewertet. Hierdurch kann beispielsweise die Anwesenheit von Personen oder Objekten überwacht werden aber auch eine Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessung durchgeführt werden.

**Technologieexperte**

Stephan Herold (intern)

**Reifegrad (über Zeitverlauf)**



**Klassifizierung**

**Art der Technologie**  
 Produkttechnologie ☐ ☒ Prozesstechnologie ☐

**Interne Technologiekompetenz**  
 gering ☐ mittel ☒ hoch ☐

**Technologiepotenzial**  
 gering ☐ mittel ☐ hoch ☒

**Lebenszyklus**  
 Entstehung ☐ Wachstum ☒ Reife ☐ Alter ☐

**Technische Randbedingungen**

**Reichweite:**  
~ 200 m

**Frequenz:**  
10 Hz – 200 Hz

**Wirtschaftliche Randbedingungen**

**Preisspanne:**  
1.000 € – 50.000 €

**Informationsquelle**

Liu et.al. - TOF Lidar Development in Autonomous Vehicle  
 Kernhof - LiDAR-Sensorsystem für automatisiertes und autonomes Fahren

**Abbildung 5.7:** Steckbrief Technologiebeschreibung (Inhalte beispielhaft)


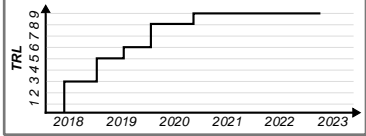
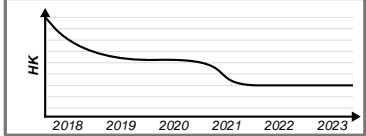
Im Anschluss an die Definition des Gesamttechnologieportfolios gilt es, die bestehenden Konzepte zur Realisierung der definierten Use Cases und Szenarien zu identifizieren. Dieser letzte Teil der Informationsbeschaffungsphase wird im Folgenden beschrieben.

**Konzepte** Ziel des Methodenansatzes ist ein Abgleich potenzieller Einsatzszenarien mit Technologiepotenzialen, um entsprechende Defizite zu identifizieren. Es gilt auch bereits bestehende Produkte oder Konzepte zur Realisierung der Einsatzszenarien zu berücksichtigen, um den zukünftigen Handlungsbedarf zu priorisieren. Durch den Abgleich des Technologiepotenzials mit Marktbedürfnissen lässt sich lediglich der theoretische Handlungsbedarf ermitteln. Findet darüber hinaus auch ein Abgleich zwischen bestehenden Konzepten bzw. Produkten und Marktbedürfnissen statt, kann durch die Priorisierung von Technologieprojekten auch eine Positionierung zum bestehenden Markt vorgenommen werden. Existieren beispielsweise für die definierten Szenarien bereits eine Vielzahl von Konzepten oder Produkten, ist eine weitere Technologieentwicklung u. U. unnötig und eine Adaption der bestehenden Konzepte zielführender.

Aus diesem Grund werden im letzten Abschnitt der Informationsbeschaffungsphase die bestehenden Konzepte und Produkte des Technologiefelds analysiert. Die Grundlage hierfür stellt eine Literatur- und Patentrecherche dar. In dieser Recherche werden, aufbauend auf den definierten Szenarien und Use Cases (vgl. Abschnitt 5.2.1), Konzepte und Produkte ermittelt, in denen die beschriebenen Aufgaben umgesetzt werden. Die Dokumentation erfolgt für jedes Konzept in einem Steckbrief, wie in Abbildung 5.8 dargestellt. Hierbei kann neben der klassischen Literatur- und Patentrecherche auch auf die Vernetzungsanalysen zurückgegriffen werden (vgl. Abschnitt 3.4). In den Konzepten werden die aktuell verfügbaren Lösungen beschrieben, auch solche, die noch einen geringen Konzeptreifegrad haben. Analog zur Identifikation relevanter Technologien werden interne und externe Quellen berücksichtigt.

Der Aufbau der Konzeptbeschreibung ist an die bereits beschriebenen Steckbriefe angelehnt. Die Bezeichnung, Abbildung und Beschreibung dienen zur Veranschaulichung der Funktionsinhalte des Konzepts bzw. des Produkts. Weiterhin werden die adressierten Szenarien und Use Cases des Konzepts angeführt, hierbei werden die entsprechenden Szenario- bzw. Use Case-IDs vermerkt. Die Dokumentation der Reifegradentwicklung über den Zeitverlauf folgt den Ansätzen zur Dokumentation von Szenarien und Technologien. In Anlehnung an Tabelle 5.1 wird der aktuelle Stand und der zu erwartende Entwicklungsverlauf in einem Diagramm aufgetragen. Der Reifegrad eines Konzepts ist unabhängig vom Reifegrad der eingesetzten Technologien, da eine konzeptspezifische Applikation der Technologien erfolgen muss. Der maximale Reifegrad des Konzepts ist durch die eingesetzten Technologien limitiert, in der Regel besteht ein zeitlicher Versatz zwischen Weiterentwicklungen auf Technologie- und Konzeptebene [159]. Um die Abhängigkeiten zur Technologieentwicklung zu dokumentieren, werden ebenfalls die eingesetzten Technologien beschrieben, auf denen die Umsetzung beruht. Für diese Technologien ist idealerweise bereits ein Technologiesteckbrief auf Grundlage der Funktionsstruktur erstellt worden. Andernfalls muss für diese Technologien ein entsprechender Steckbrief erstellt werden und eine Funktionszuordnung überprüft werden. Somit kann eine Ergänzung des Gesamttechnologieportfolios erfolgen. Freitextflächen bieten weiterhin die Möglichkeit, technische Leistungsparameter der Konzepte abzubilden.

Analog zur Dokumentation der technologischen Reifegradentwicklung wird auch die Kostenentwicklung über den Zeitverlauf für das Konzept erfasst. Dies beruht auf der Annahme, dass mit fortschreitendem Entwicklungsverlauf die Herstellkosten für die eingesetzten Technologien sinken [76]. Dieser Verlauf kann für einen späteren Abgleich mit den Szenarioanforderungen herangezogen werden. Soweit dieser bekannt ist, wird der Konzeptverantwortliche dokumentiert. Dies ist vor allem bei unternehmensinternen Konzepten bzw. Produkten relevant, da für

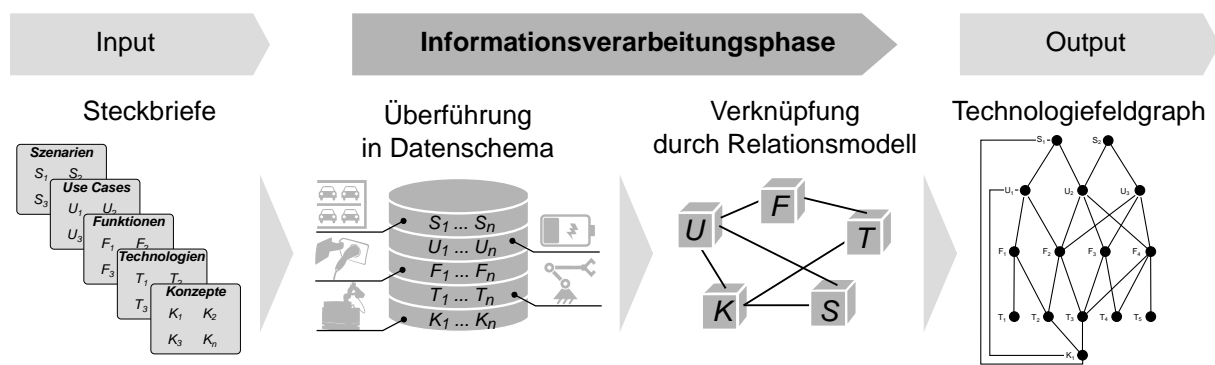
Bezeichnung des Konzepts/Produkts		ID: K
Volkswagen AG/KUKA CarLa		ID: K <sub>1</sub>
<b>Skizze/Abbildung</b> 	<b>Konzeptreifegrad (über Zeitverlauf)</b> 	
<b>Beschreibung des Konzepts/Produkts</b> <p>In dem Forschungsprojekt stellt CarLa, ein mobiler, omnidirektionaler KUKA-Roboter die elektrische Verbindung zwischen einem Elektro-fahrzeug und einer Ladestation her. Der Fahrer positioniert Fahrzeug in einer definierten Fläche, das Einstecken des Ladekabels wird von einem mobilen Roboter übernommen. Auch eine autonome Parkfunktion ist denkbar. In der Parkposition wird das Fahrzeug vom Service-Roboter geladen. Das Konzept besteht aus einem KUKA KMR iiwa sowie einem Greif- und Messsystem um den Steckvorgang vollautomatisiert durchzuführen.</p>	<b>Technische Leistungsparameter</b> <p><b>Gewicht:</b> 450 kg  <b>Benötigte Fahrzeugschnittstelle:</b>  - automatische Ladeklappe  - Kommunikationsschnittstelle  <b>Energieverbrauch:</b>  200 W/h</p>	
	<b>Herstellkosten (über Zeitverlauf)</b> 	
<b>Adressierte Szenarien/Use Cases</b> S <sub>1</sub> , S <sub>3</sub> / U <sub>1</sub>	<b>Herkunft</b> intern <input checked="" type="checkbox"/> extern <input type="checkbox"/>	
<b>Konzeptverantwortlicher</b> Max Mustermann	<b>Eingesetzte Technologien</b> T <sub>1</sub> , T <sub>3</sub> , T <sub>5</sub>	
	<b>Informationsquelle</b> <a href="https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2018/03/karla-charges-the-car.html">https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2018/03/karla-charges-the-car.html</a>	

**Abbildung 5.8:** Steckbrief Konzeptbeschreibung (Inhalte beispielhaft)

eventuelle Rückfragen ein Ansprechpartner definiert ist. Um zudem die Nachverfolgbarkeit der eingetragenen Daten zu ermöglichen, werden die Informationsquellen aufgenommen. Nachdem die bestehenden Konzepte und Produkte beschrieben sind, ist die Informationsbeschaffungsphase abgeschlossen. Es liegt eine breite Informationsbasis für die Aufbereitung und Bildung eines TFG im Rahmen der nächsten Phase des Methodenansatzes bereit. Sollte sich jedoch im Laufe der weiteren Anwendung herausstellen, dass relevante Informationen nicht vorhanden sind, kann die Informationsbeschaffungsphase wiederholt oder ergänzt werden.

### 5.3 Informationsverarbeitungsphase

Das Ziel der Informationsverarbeitungsphase ist es, die zuvor gesammelten Daten in eine strukturierte Form zu überführen und auf Grundlage eines Relationsmodells in einem Technologiefeldgraphen zu verdichten. Dieser Technologiefeldgraph bildet die Abhängigkeiten innerhalb eines Technologiefelds zwischen Szenarien, Use Cases, Funktionen, Technologien und Konzepten ab. Er dient als Entscheidungsgrundlage für Fragestellungen der strategischen Technologieplanung, wie der Technologieauswahl oder dem Technologietiming (vgl. Abschnitt 3.3.2).



**Abbildung 5.9:** Ablauf der Informationsverarbeitungsphase

In Abbildung 5.9 ist der Ablauf der Informationsverarbeitungsphase dargestellt. Als Eingangsgröße werden die dokumentierten Steckbriefe aus der Informationsbeschaffung herangezogen. Die Steckbriefe werden in ein einheitliches Datenschema überführt, das auf dem Aufbau eines Property-Graphen basiert (vgl. Abschnitt 4.3). Das Datenschema legt den Aufbau der unterschiedlichen Knotentypen fest und definiert die in den Knoten gespeicherten Daten. Es wird zwischen den Knotentypen der Szenarien, Use Cases, Funktionen, Technologien und Konzepten unterschieden, die jeweils über klassenspezifische Attribute charakterisiert sind. Mithilfe des Relationsmodells werden die unterschiedlichen Knotentypen des TFG im Anschluss verknüpft und eine Strukturierung des Graphen erreicht. Das Relationsmodell beschreibt die Struktur des Graphen und die Beziehungen zwischen den Hierarchieebenen. Als Ausgangsgröße der Informationsverarbeitungsphase steht der TFG zur Verfügung, der als attributierter und gerichteter Graph das Technologiefeld repräsentiert.

An dieser Stelle zeigt sich auch die Unterscheidung zur Wechselwirkungsanalyse. In der klassischen Wechselwirkungsanalyse werden die Abhängigkeiten zwischen Elementen des gleichen Typs untersucht (Projekte, Technologien etc.). Durch die in diesem Abschnitt vorgestellte Erweiterung ist es möglich, Elemente unterschiedlichen Typs in einem Graph miteinander zu verknüpfen und Wechselwirkungen abzubilden.

### 5.3.1 Datenschema

Das Datenschema bildet die Grundlage für den Aufbau eines Property-Graphen. In Abschnitt 4.3 ist bereits der allgemeine Aufbau eines Property-Graphen beschrieben. Diesen Aufbau gilt es für die Anwendung innerhalb des Methodenansatzes zu adaptieren und die in der Informationsbeschaffungsphase gesammelten Daten adäquat in eine Graphendarstellung zu überführen. Durch das Datenschema wird die Struktur der Knoten des TFG beschrieben. Das Datenschema legt fest, welche knotenspezifischen Properties (Schlüssel-Wert-Zuordnungen oder auch Attribute) zu definieren sind und welche Wertebereiche und Datentypen diese umfassen können. In Abbildung 5.10 sind die Knotentypen des TFG mit ihren Attributen und den entsprechenden Datentypen dargestellt. Hier wird zwischen den aus der Informatik bekannten Datentypen String und Integer unterschieden [95]. Für jeden Knotentyp wird den Attributen der entsprechende Datentyp zugeordnet. Der Aufbau des Datenschemas folgt der Kategorisierung der Informationsbeschaffungsphase.

Szenario	Use Case	Funktion	Technologie	Konzept
<b>Titel:</b> STRING <b>ID:</b> INTEGER <b>Beschreibung:</b> STRING <b>Ersteller:</b> STRING <b>Geforderter Reifegrad:</b> INTEGER (dynamisch) <b>Relevanz:</b> INTEGER <b>Allg. Randbed:</b> STRING <b>Techn. Randbed.:</b> STRING <b>Wirt. Randbed.:</b> STRING <b>Geforderte Kosten.:</b> INTEGER	<b>Titel:</b> STRING <b>ID:</b> INTEGER <b>Beschreibung:</b> STRING <b>Ersteller:</b> STRING	<b>Titel:</b> STRING <b>ID:</b> INTEGER	<b>Titel:</b> STRING <b>ID:</b> INTEGER <b>Beschreibung:</b> STRING <b>Ansprechpartner:</b> STRING <b>Realistischer Reifegrad:</b> INTEGER (dynamisch) <b>Technologieart:</b> STRING <b>Interne Kompetenz:</b> STRING <b>Potenzial:</b> STRING <b>Lebenszyklus:</b> STRING <b>Techn. Randbed.:</b> STRING <b>Wirt. Randbed.:</b> STRING <b>Informationsquelle:</b> STRING	<b>Titel:</b> STRING <b>ID:</b> INTEGER <b>Beschreibung:</b> STRING <b>Ansprechpartner:</b> STRING <b>Realistischer Reifegrad:</b> INTEGER (dynamisch) <b>Allg. Randbed:</b> STRING <b>Techn. Randbed.:</b> STRING <b>Realistische Kosten:</b> INTEGER (dynamisch) <b>Herkunft:</b> STRING <b>Informationsquelle:</b> STRING

**Abbildung 5.10:** Datenschema des Technologiefeldgraphen

Die Skizzen und Abbildungen der Steckbriefe werden an dieser Stelle nicht in dem Datenschema abgebildet, da diese in der Informationsbewertungsphase nicht berücksichtigt werden. Jedoch lässt sich über die ID im Nachgang eine Steckbriefzuordnung vornehmen und die Abbildung in eine Technologiefelddarstellung einbinden (vgl. Abschnitt 5.3.3). [129, 167]

Im Rahmen der Bewertungsphase werden die Properties des Graphen in unterschiedlicher Weise berücksichtigt. Properties, wie die Beschreibung oder die Kategorisierung der Technologien, sollen Entscheidungsträgern bei der Ausrichtung des Technologiefelds erweiterte Informationen bereitstellen. Diese Arten der Properties dienen vornehmlich dem Zweck, die menschliche Entscheidung zu unterstützen. Eine Berücksichtigung ist abhängig von der verfolgten Fragestellung und kann individuell im Rahmen der Priorisierung erfolgen (vgl. Abschnitt 5.4.5). Für eine quantitative Analyse des Technologiefelds können diese Informationen nur eingeschränkt genutzt werden. Die Bewertung technologischer, monetärer und zeitlicher Abhängigkeiten und die entsprechende Priorisierung von Technologieprojekten ist die Zielstellung des Methodenansatzes (vgl. Abschnitt 3.6). Die Kenngrößen, die für die Beantwortung dieser Fragestellungen besonders relevant sind, werden daher im Folgenden genauer betrachtet.

Bei der Abbildung der Reifegradverläufe bzw. der zeitlichen Reifegradentwicklungen innerhalb der Knotentypen Szenario, Technologie und Konzept ist zu beachten, dass es sich um dynamische Kenngrößen handelt. Diese sind nicht als statische Werte anzunehmen, sondern repräsentieren durch ihren zeitlichen Verlauf zum einen die Veränderungen der Marktanforderungen und zum anderen die Entwicklungsfortschritte auf technologischer Seite. Um diese dynamischen Entwicklungen in dem Datenschema abbilden zu können, kommen entsprechende Matrizen zum Einsatz, die mit den Informationen der Steckbriefe definiert werden. Die Matrizen beschreiben für jeden Zeitpunkt  $t_1, \dots, t_n \in t$  den Reifegrad für die Szenarien, Technologien und Konzepte.

Der geforderte Reifegrad  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^S(S, t)$  der Szenarien  $S$  wird zum Zeitpunkt  $t_k \in t$  auf Grundlage des Reifegradmodells (vgl. Abschnitt 5.2.1) definiert und beschreibt, welchen Entwicklungsstand ein Szenario zu welchem Zeitpunkt voraussetzt. Die Matrix folgt dem Schema:

$$\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^S(S, t) = \begin{pmatrix} \text{TRL}_{\text{gef}}^S(S_1, t_1) & \text{TRL}_{\text{gef}}^S(S_1, t_2) & \dots & \text{TRL}_{\text{gef}}^S(S_1, t_n) \\ \text{TRL}_{\text{gef}}^S(S_2, t_1) & \text{TRL}_{\text{gef}}^S(S_2, t_2) & \dots & \text{TRL}_{\text{gef}}^S(S_2, t_n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \text{TRL}_{\text{gef}}^S(S_{n_S}, t_1) & \text{TRL}_{\text{gef}}^S(S_{n_S}, t_2) & \dots & \text{TRL}_{\text{gef}}^S(S_{n_S}, t_n) \end{pmatrix}. \quad (5.1)$$

Die Einträge  $\text{TRL}_{\text{gef}}^S(S_i, t_k)$  der Matrix definieren den geforderten Reifegrad von Szenario  $S_i$  zum Zeitpunkt  $t_k$ . Auf gleiche Weise werden die Verläufe der Reifegrade für die Technologien und Konzepte ausgedrückt. Die Matrix  $\mathbf{TRL}_{\text{real}}^T(T, t)$  legt den realisierbaren Reifegrad der Technologie  $T_m$  zum Zeitpunkt  $t_k$  fest. Der Reifegrad der Konzepte wird durch eine gesonderte Matrix beschrieben.  $\mathbf{TRL}_{\text{real}}^K(K, t)$  definiert den realistischen Reifegrad des Konzepts  $K_o$  zum Zeitpunkt  $t_k$ . Es ist zu beachten, dass es sich um diskrete Zeitzustände handelt, die innerhalb der Bewertungsmatrizen konsistent sein müssen. Somit müssen für die Definition der Reifegradmatrizen festgelegte Zeitintervalle  $t_1, \dots, t_n \in t$  verwendet werden. Die Größe dieser Zeitintervalle ist von der Gesamtlänge des betrachteten Zeitraums und von der Entwicklungsdynamik des Technologiefelds abhängig. Ist das Technologiefeld durch eine hohe Entwicklungsdynamik geprägt, kann beispielsweise ein Zeitintervall von wenigen Wochen gewählt werden. Für eine langfristige Betrachtung ist jedoch auch ein Zeitintervall von mehreren Monaten valide. Auf Grundlage des Zeitintervalls ergeben sich für die Beschreibung der Reifegrade abschnittsweise definierte Funktionsverläufe, die an den Nahtstellen einen Sprung des Reifegrads aufweisen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die Herstellkosten nach dem vereinfachten Kostenmodell der VDI Richtlinie 2225 [185] zurückgegriffen. Unter den Herstellkosten (HK) werden die Materialkosten (MK) und Fertigungskosten (FK) aufsummiert. Die Materialkosten bezeichnen die Kosten, die für den Aufwand von Material und Energie während der Produktion entstehen. In den Fertigungskosten sind entsprechend die nicht materialbezogenen Kosten, wie beispielsweise Fertigungslöhne, während der Produktion berücksichtigt. Die Herstellkosten ergeben sich entsprechend zu:

$$HK = MK + FK. \quad (5.2)$$

Auf eine vertiefte Betrachtung des Kostenmodells wird an dieser Stelle verzichtet, da lediglich die resultierende Kenngröße für den Methodenansatz relevant ist. Der entwickelte Ansatz ist jedoch nicht auf die Verwendung dieses Kostenmodells beschränkt, auch andere Berechnungsmodelle, wie das Total-Cost-of-Ownership-Modell (TCO)[71], können angewendet werden. Um die wirtschaftlichen Randbedingungen der Szenarien in dem Datenschema abzubilden, werden die eingetragenen Kennwerte des Steckbriefs in den Vektor  $HK_{\text{gef}}^S(S)$  überführt. Hierbei ist zu beachten, dass ein einheitliches Berechnungsmodell der Kosten zugrunde gelegt wird. Dies gilt sowohl für die Bestimmung der Kostenanforderungen auf Szenarioseite als auch für die Berechnung der Kosten auf Konzeptseite. Somit wird die Vergleichbarkeit der Bewertungsgrößen im Rahmen der Informationsbewertungsphase sichergestellt.

Die Herstellkosten auf Konzeptseite werden durch die Matrix  $\mathbf{HK}_{\text{real}}^K(K, t)$  abgebildet. Die Matrix gibt an, welche realistischen Kosten für ein Konzept/Produkt  $K_o$  zum Zeitpunkt  $t_k$  erwartet werden. Entsprechend ergibt sich der Aufbau der Matrix wie folgt:

$$\mathbf{HK}_{\text{real}}^K(K, t) = \begin{pmatrix} HK_{\text{real}}^K(K_1, t_1) & HK_{\text{real}}^K(K_1, t_2) & \dots & HK_{\text{real}}^K(K_1, t_n) \\ HK_{\text{real}}^K(K_2, t_1) & HK_{\text{real}}^K(K_2, t_2) & \dots & HK_{\text{real}}^K(K_2, t_n) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ HK_{\text{real}}^K(K_{n_K}, t_1) & HK_{\text{real}}^K(K_{n_K}, t_2) & \dots & HK_{\text{real}}^K(K_{n_K}, t_n) \end{pmatrix}. \quad (5.3)$$

Die Zeitintervalle und die zeitliche Dimension dieser Matrizen müssen mit den Matrizen der Reifegradverläufe übereinstimmen, um konsistente Bewertungsgrößen zu schaffen. Die Darstellung der Kosten über den Zeitverlauf ermöglicht es, dass eine Kostenreduktion durch Erfahrungswerte abgebildet werden kann.

Die Relevanzen der Szenarien werden in die Bewertung integriert, indem die qualitative Abstufung (gering/mittel/hoch) in einen quantitativen Ausdruck überführt wird. Hierzu wird eine Ordinalskala mit den Werten von 1 bis 3 verwendet. Der Wert 1 drückt eine geringe Relevanz aus, mit 2 wird eine mittlere Relevanz beschrieben und 3 bildet eine hohe Relevanz ab. Bei dieser Ordinalskala ist zu berücksichtigen, dass lediglich ein Präferenzranking vorgenommen wird, in dem die Abstände zwischen den diskreten Bewertungsgrößen nicht quantifizierbar sind. Es ist lediglich eine relative und keine absolute Bewertung möglich [133]. Die quantitative Relevanzbewertung der Szenarien wird durch den Vektor  $Rel^S(S)$  zusammengefasst. In Tabelle 5.2 sind die beschriebenen Bewertungsgrößen beschrieben, die durch das Datenschema in eine Matrix- oder Vektordarstellung überführt und den entsprechenden Knotenattributen des TFG zugeordnet werden. Hierbei ist ebenfalls die Ordnung der entsprechenden Matrix dokumentiert.

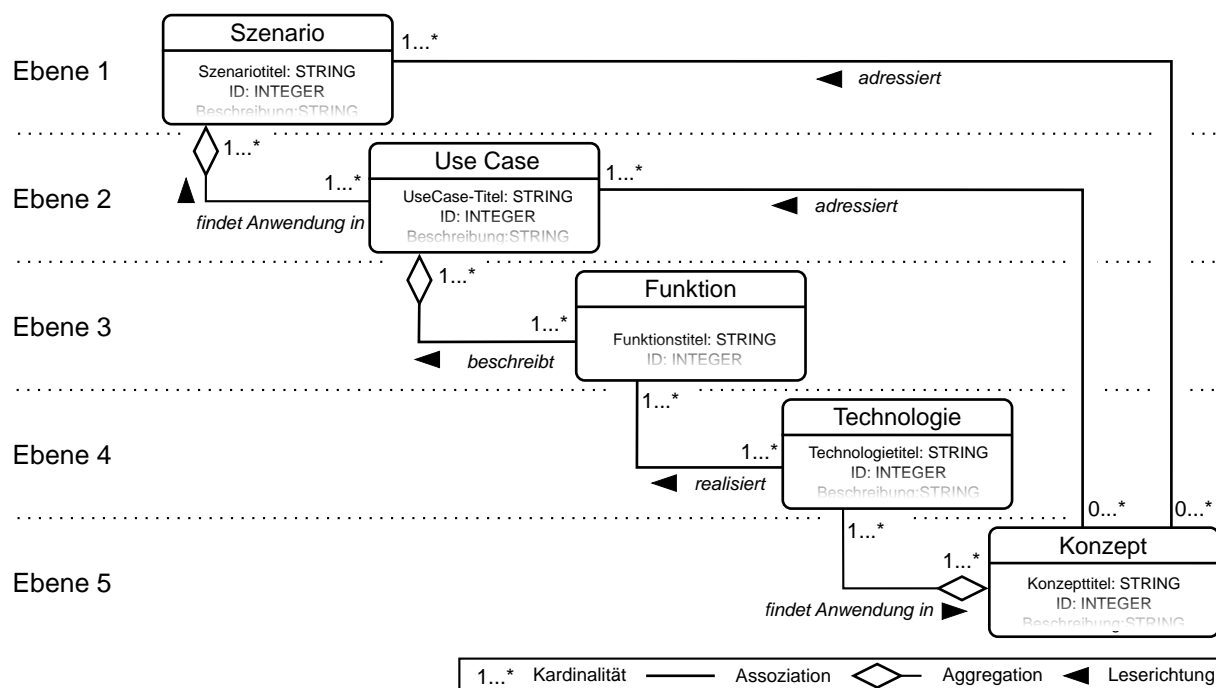
**Tabelle 5.2:** Bewertungsgrößen des Datenschemas

Knotentyp	Matrix/Vektor	Beschreibung	Ordnung
Szenario	$\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^S(S, t)$	gefordertes TRL für das Szenario $S_j$ zu $t_k$	$n_S \times t$
Szenario	$HK_{\text{gef}}^S(S)$	geforderte Kosten für das Szenario $S_j$	$n_S$
Szenario	$Rel^S(S)$	Relevanz des Szenarios $S_j$	$n_S$
Technologie	$\mathbf{TRL}_{\text{real}}^T(T, t)$	realistischer TRL für Technologie $T_m$ zu $t_k$	$n_T \times t$
Konzept	$\mathbf{TRL}_{\text{real}}^K(K, t)$	realistischer TRL für das Konzept $K_o$ zu $t_k$	$n_K \times t$
Konzept	$\mathbf{HK}_{\text{real}}^K(K, t)$	realistische HK für das Konzept $K_o$ zu $t_k$	$n_K \times t$

Durch das Datenschema werden die in der Informationsbeschaffungsphase definierten Steckbriefe in die Knotendarstellung eines Property-Graphen überführt. Hierbei repräsentiert jeder Steckbrief einen eigenen Knoten des Graphen. Im nächsten Schritt gilt es, diese Knoten zu einem TFG zu vernetzen. Die Beziehungen sind durch die Informationsbeschaffungsphase zwar bekannt, werden jedoch durch das Relationsmodell in eine strukturierte Form überführt. Das Relationsmodell legt fest, welche Arten von Beziehung (Kanten) zwischen den Knoten des TFG bestehen können.

### 5.3.2 Relationsmodell

Durch das Relationsmodell wird der innere Aufbau des TFG definiert. Es legt fest, welche Knotentypen des Datenschemas (vgl. Abbildung 5.10) miteinander in Relation stehen und welche Art von Relation vorliegt. Die individuelle Verknüpfung der Knoten ist für jedes Technologiefeld individuell auf Grundlage der Informationsbeschaffungsphase festzulegen. Das Relationsmodell legt die Struktur für die Verknüpfung zugrunde. Der Aufbau des Relationsmodell folgt einer hierarchischen Struktur, in der die Knotentypen Szenario, Use Case, Funktion, Technologie und Konzept jeweils eine eigene Hierarchieebene bilden.



**Abbildung 5.11:** Relationsmodell in UML-Darstellung

Die oberste Hierarchieebene bilden die Szenarien als Beschreibung der äußeren Randbedingungen, gefolgt von den Use Cases in der zweiten Hierarchieebene. In der dritten Ebene reihen sich die Funktionen als Konkretisierung der Use Cases an. Durch die Technologien wird die vierte Hierarchiestufe gebildet. Die letzte Hierarchieebene wird durch die Konzepte definiert. Auf den obersten Hierarchiestufen werden die marktseitigen Anforderungen abgebildet, in den unteren Ebenen hingegen die technologischen Möglichkeiten. Die Verknüpfung erfolgt durch die Funktionsebene.

In Abbildung 5.11 ist der hierarchische Aufbau des Relationsmodells mithilfe der Unified Modeling Language (UML) beschrieben. Ferner sind die Beziehungen zwischen den Knotentypen dargestellt. In der Darstellung wird eine Assoziation durch eine einfache Linie dargestellt und signalisiert das Vorhandensein einer Beziehung zwischen den Knotentypen. Die Art der Assoziation wird über eine Beschreibung definiert, die zusätzlich mit einer Leserichtung versehen ist. Die Leserichtung wird durch einen Pfeil dargestellt. Eine besondere Form der Assoziation bildet die sogenannte Aggregation. Eine Aggregation liegt vor, wenn eine Beziehung zwischen einem *Ganzen* und seinen *Teilen* beschrieben wird, und zeigt die Zusammensetzung eines Knoten.



Die Raute ist mit dem Ganzen der Assoziation verbunden. Über die Darstellung der Multiplizität wird die obere und untere Grenze eingehender und ausgehender Relationen angezeigt. Somit wird festgelegt, mit welcher Anzahl an Knoten anderen Typs ein Element verbunden sein muss bzw. darf. [57]

Der Knotentyp *Szenario* ist mit mindestens einem *Use Case* verknüpft, eine Verknüpfung mit weiteren Use Cases ist ebenfalls zulässig. Die Relation drückt aus, dass ein Use Case in einem oder mehreren Szenarien Anwendung findet und sich dementsprechend ein Szenario aus mehreren Use Cases zusammensetzt. Durch die Phase der Informationsbeschaffung (vgl. Abschnitt 5.2.1), in welcher durch einen Kreativworkshop sowohl Szenarien als auch Use Cases identifiziert wurden, ist ebenfalls die Zuordnung von Szenarien und Use Cases bekannt. Somit lässt sich auch die erste Ebene des TFG bilden und Use Cases mit Szenarien zueinander in Beziehung setzen.

In der weiteren Abstufung ist ein Use Case durch die Aggregation mehrerer *Funktionen* beschrieben. Ein Use Case muss mit mindestens einer Funktion verknüpft sein, umgekehrt kann eine Funktion zur Beschreibung verschiedener Use Cases herangezogen werden. Durch den zweiten Schritt der Informationsbeschaffungsphase ist die Funktionsstruktur der Use Cases bekannt (vgl. Abschnitt 5.2.2). Entsprechend lassen sich die Relationen zwischen den einzelnen Funktionen mit den Use Cases in den TFG abbilden. Hierbei werden lediglich die Teilfunktionen berücksichtigt, die Hauptfunktion findet keine weitere Verwendung. Neben der Verknüpfung zu Use Cases besteht ebenfalls eine Relation zwischen dem Knotentyp der Funktion und der *Technologie*. Durch den Einsatz einer Technologie lassen sich eine oder mehrere Funktionen realisieren. In entgegengesetzter Richtung lässt sich eine Funktion durch unterschiedliche Technologien umsetzen. Diese Beziehung baut auf der Logik der funktionalen Produktbeschreibung auf (vgl. Abschnitt 3.1.2). Im Rahmen des Technologiescoutings der Informationsbeschaffungsphase (vgl. Abschnitt 5.2.3) ist durch die Definition der Technologiefunktionsportfolios bekannt, welche Technologien in Relation zu welchen Funktionen stehen. Auf dieser Grundlage lässt sich die dritte Ebene des TFG aufbauen.

Auf der andere Seite besteht zwischen dem Knotentyp der Technologie eine Beziehung zum Knotentyp *Konzept*. Konzepte sind als technische Produkte zu verstehen und werden durch die Kombination verschiedener Technologien gebildet. Diese Beschreibungslogik baut auf der technischen Produktstruktur auf, in der Technologien zur Realisierung der funktionalen Produktstruktur eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 3.1.2). Entsprechend ist auch die Beziehungslogik ausgestaltet. Eine Technologie findet in einem oder mehreren Konzepten ihre Anwendung, wohingegen ein Konzept durch mindestens eine Technologie oder die Kombination mehrerer Technologien gebildet wird. Die Zuordnung von Technologien und Konzepten erfolgt auf Grundlage der Konzeptsteckbriefe, in denen die verwendeten Technologien dokumentiert sind. Abschließend besteht zwischen dem Knotentyp Konzept wiederum eine Beziehung zu den Knotentypen des Szenarios und des Use Cases. Konzepte stellen die technische Realisierung einer Szenario-Use Case-Kombination dar. Eine Kombination von Szenario und Use Case beschreibt einen Anwendungsfall für ein Konzept bzw. Produkt vollumfänglich (vgl. Abschnitt 5.2.1). Entsprechend adressiert ein Konzept mindestens ein Szenario und einen Use Case. Im Umkehrschluss können für Szenarien und Use Cases Beziehungen zu Konzepten bestehen, sofern ein Konzept für diese Szenario-Use Case-Kombination vorhanden ist. Als Grundlage für die Zuordnung dienen die Steckbriefe der Konzepte (vgl. Abschnitt 5.2.3), auf denen die adressierten Szenarien und Use Cases vermerkt sind.

Durch das Datenschema sind Knotentypen sowie deren Properties beschrieben. Die Überführung der Steckbriefe in das Datenschema liefert entsprechend die mit Informationen attribuierten Knoten des TFG. Durch das Relationsmodell werden die Beziehungstypen zwischen den Knotentypen festgelegt und das Schema für die Verknüpfung definiert. Auf Grundlage des Relationsmodell erfolgt die auf das Technologiefeld angepasste Verknüpfung der Knoten und die Beschreibung der Kanten des TFG. Die Knotenmenge  $V$  des TFG lässt sich aufgrund der Hierarchieebenen in die disjunkte Teilmenge der Szenarien  $V_S$ , Use Cases  $V_U$ , Funktionen  $V_F$ , Technologien  $V_T$  und Konzepte  $V_K$  aufteilen. Jede dieser Teilmengen repräsentiert eine Hierarchieebene des Graphen. Um die Abhängigkeiten zwischen diesen Teilmengen in mathematischer Form abzubilden, können zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt werden. Es kann eine gesamtheitliche Adjazenzmatrix  $A$  gebildet werden, die alle Kanten des TFG umfasst (vgl. Abschnitt 4.1). Diese Matrix wird manuell aus den Ergebnissen der Informationsbeschaffungsphase erstellt. Da die Größe der Matrix quadratisch mit der Anzahl der Knoten steigt (vgl. Abschnitt 4.1), ist eine manuelle Erstellung entsprechend komplex und zeitaufwendig. Aus diesem Grund erfolgt die Darstellung der Relationen in Form von individuellen *Relationsmatrizen*, die ausschließlich die Abhängigkeit zwischen den Knotentypen zweier Hierarchieebenen abbilden. Durch die Betrachtung eines eingeschränkten Relationsraums wird die Übersichtlichkeit gewährleistet. Die Vereinigung der einzelnen Relationsmatrizen ermöglicht es darüber hinaus, die vollständige Adjazenzmatrix  $A$  des Technologiefeldgraphen zu bestimmen. In Tabelle 5.3 ist eine Übersicht der verwendeten Relationsmatrizen dargestellt.

**Tabelle 5.3:** Übersicht der Relationsmatrizen

Relationsmatrix	Beschreibung	Ordnung
${}^U\mathbf{A}_S(U, S)$	Use Cases $U_j$ findet Anwendung in Szenario $S_i$ , falls ${}^U\mathbf{A}_S(U_j, S_i) = 1$	$n_U \times n_S$
${}^F\mathbf{A}_U(F, U)$	Funktion $F_l$ beschreibt Use Case $U_j$ , falls ${}^F\mathbf{A}_U(F_l, U_j) = 1$	$n_F \times n_U$
${}^T\mathbf{A}_F(T, F)$	Technologie $T_m$ realisiert Funktion $F_l$ , falls ${}^T\mathbf{A}_F(T_m, F_l) = 1$	$n_T \times n_F$
${}^T\mathbf{A}_K(T, K)$	Technologie $T_m$ findet Anwendung in Konzept $K_o$ , falls ${}^T\mathbf{A}_K(T_m, K_o) = 1$	$n_T \times n_K$
${}^K\mathbf{A}_S(K, S)$	Konzept $K_o$ adressiert Szenario $S_i$ , falls ${}^K\mathbf{A}_S(K_o, S_i) = 1$	$n_K \times n_S$
${}^K\mathbf{A}_U(K, U)$	Konzept $K_o$ adressiert Use Case $U_j$ , falls ${}^K\mathbf{A}_U(K_o, U_j) = 1$	$n_K \times n_U$

mit  $n_S$  Anzahl an Szenarien,  $n_U$  Anzahl an Use Cases,  $n_F$  Anzahl an Funktionen,  $n_T$  Anzahl an Technologien und  $n_K$  Anzahl an Konzepten des Technologiefeldgraphen  $G$

Durch die Relationsmatrix  ${}^U\mathbf{A}_S$  wird ausgedrückt, welche Use Cases in welchen Szenarien ihre Anwendung finden. Die Matrix  ${}^F\mathbf{A}_U$  stellt die Verknüpfung zwischen der Ebene der Funktionen und Use Cases her. Mit  ${}^T\mathbf{A}_F$  werden die Beziehung zwischen Technologien und Funktionen beschrieben. Über die Matrix  ${}^T\mathbf{A}_K$  wird beschrieben, welche Technologien in welchen Konzepten angewendet werden. Abschließend wird durch die Matrizen  ${}^K\mathbf{A}_S$  und  ${}^K\mathbf{A}_U$  beschrieben, welche Szenarien und Use Cases durch welche Konzepte adressiert werden.

Ob diese Abhängigkeit monetärer, technologischer oder zeitlicher Art ist, wird an dieser Stelle zunächst vernachlässigt. Die Art der Abhängigkeit wird erst in der Informationsverarbeitungsphase berücksichtigt. Da es sich bei den Matrixeinträgen lediglich um gerichtete Abhängigkeiten analog dem Relationsmodell handelt, ist der Wertebereich der Matrixeinträge beschränkt. Besteht eine Relation zwischen Element  $i$  und Element  $j$ , so ist der entsprechende Eintrag  $a_{ij} = 1$ . Andernfalls ist der Eintrag  $a_{ij} = 0$ . Die Richtung der Kante ist immer von Element  $i$  auf Elemente  $j$  gerichtet, beruhend auf dem Relationsmodell.

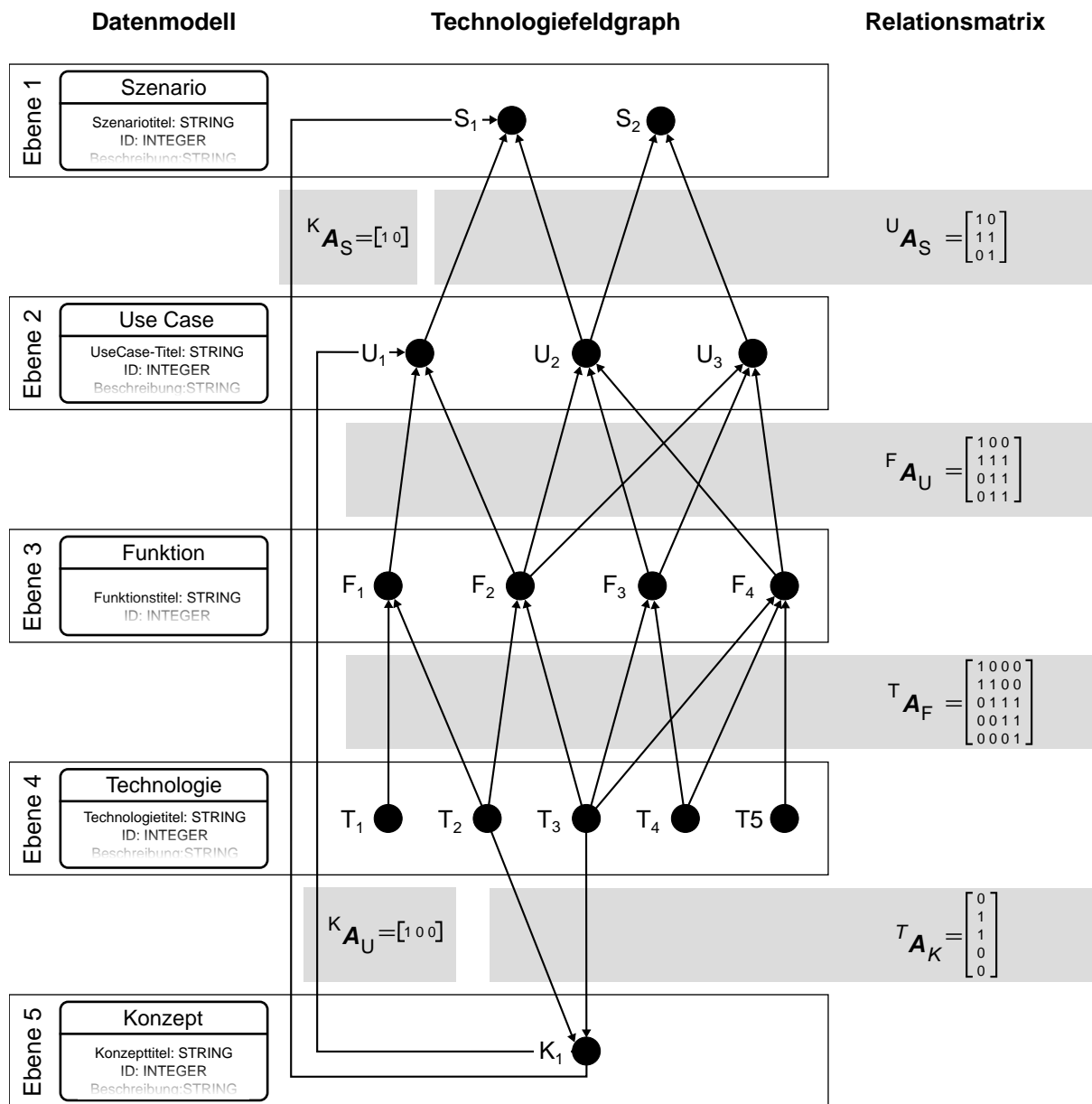
Durch die Kombination des Datenschemas und des Relationsmodells besteht die Möglichkeit, die in der Informationsbeschaffungsphase gesammelten Informationen in einen Technologiefeldgraphen zu überführen. In Anhang A.13 ist der strukturelle Gesamtaufbau eines TFG inklusive der Knotenattribute in Form eines UML-Diagramms dargestellt. Für ein besseres Verständnis werden im nächsten Abschnitt der Aufbau eines beispielhaften TFG beschrieben und die Einflüsse von Datenschema und Relationsmodell erläutert.

### 5.3.3 Technologiefeldgraph

Als Ergebnis der Informationsaufbereitungsphase kann auf Grundlage von Datenschema und Relationsmodell ein Technologiefeldgraph aufgebaut werden, der Abhängigkeiten zwischen den Szenarien, Use Cases, Funktionen, Technologien und Konzepten repräsentiert. Die Inhalte der Steckbriefe sind in Knotenattribute überführt und bilden die Grundlage für die Bewertungsphase. Der hierarchische Aufbau des TFG ermöglicht es, unterschiedliche Knotentypen miteinander zu verknüpfen und so die fünf Hierarchieebenen zu bilden. Dies adressiert die Zielsetzung, Market-Pull und Technology-Push miteinander zu synchronisieren und die Ergebnisse auf die Dimensionen des Roadmappings abzubilden (vgl. Abschnitt 3.6).

In Abbildung 5.12 ist ein beispielhafter Technologiefeldgraph  $G$  mit reduzierter Komplexität dargestellt. Abhängigkeiten zwischen den Knoten des TFG werden durch Relationsmatrizen abgebildet, die auf Grundlage eines einheitlichen Relationsmodells die Kanten des Graphen repräsentieren (vgl. Abschnitt 5.3.2). Auf der obersten Ebene des TFG befinden sich die Knoten der Szenarien, die über die Attribute entsprechend dem Datenschema beschrieben sind. Durch die Relationsmatrix  ${}^U\mathbf{A}_S$  wird die Beziehung zur Ebene der Use Cases, entsprechend dem Relationsmodell, hergestellt. Die Knoten der Use Cases sind ebenfalls entsprechend dem Datenschema attribuiert.

Um die Ebene der Funktionen anzugliedern, ist mit der Relationsmatrix  ${}^F\mathbf{A}_U$  die Ausbildung der Kanten zwischen Funktionen und Use Cases beschrieben. Die Funktionsebene kann als Verbindungsebene zwischen marktseitigen Anforderungen und technologischen Potenzialen gesehen werden. Diese Verknüpfung wird durch die Relationsmatrix  ${}^T\mathbf{A}_F$  definiert, die eine Zuordnung zwischen Technologien und Funktionen vornimmt. Da eine strategische Technologieplanung stets auch die am Markt bestehenden Konzepte und Produkte berücksichtigen muss, um ggf. eine externe Technologiebeschaffung vorzunehmen, werden auch diese in den TFG einbezogen. Die unterste Ebene wird deshalb durch die Konzepte und Produkte gebildet, die über die Relationsmatrix  ${}^T\mathbf{A}_K$  zum einen mit der Technologieebene verknüpft sind. Zum anderen beschreiben die Matrizen  ${}^K\mathbf{A}_S$  und  ${}^K\mathbf{A}_U$  die Abhängigkeiten zu den Ebenen der Szenarien und Use Cases, die das Konzept bzw. Produkt adressiert (vgl. Abschnitt 5.3.2).



**Abbildung 5.12:** Exemplarischer Aufbau und Beschreibung eines Technologiefeldgraphen durch Datenmodell und Relationsmatrizen

In Anlehnung an den Aufbau eines Property-Graphen wird der TFG einerseits durch eine Menge an attribuerter und beschrifteter Knoten  $V$  beschrieben. Andererseits werden die Relationen zwischen den Knoten durch die beschrifteten Kanten  $E$  bestimmt. Aus dem Relationsmodell ist lediglich die Abhängigkeit zwischen den unterschiedlichen Ebenen bekannt und durch die entsprechenden Matrizen dokumentiert. Dies ist für die manuelle Erstellung vorteilhaft, da ausschließlich ein eingeschränkter Bewertungsraum betrachtet werden muss und eine intuitive Bearbeitung ermöglicht wird.

Um jedoch eine vollständige, mathematische Beschreibung als Grundlage für die Informationsbewertungsphase zu schaffen, werden die einzelnen Relationsmatrizen zu einer gesamtheitlichen Adjazenzmatrix  $\mathbf{A}_{\text{ges}}$  kombiniert. Somit wird der Technologiefeldgraph durch eine einheitliche Matrix beschrieben, die zur Analyse herangezogen werden kann. Diese entsprechende Matrix ergibt sich zu:

$$\mathbf{A}_{\text{ges}} = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_1, \dots, S_{n_S} & U_1, \dots, U_{n_U} & F_1, \dots, F_{n_F} & T_1, \dots, T_{n_T} & K_1, \dots, K_{n_K} \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_1 \\ \vdots \\ S_{n_S} \\ U_1 \\ \vdots \\ U_{n_U} \\ F_1 \\ \vdots \\ F_{n_F} \\ T_1 \\ \vdots \\ T_{n_T} \\ K_1 \\ \vdots \\ K_{n_K} \end{matrix} & \left[ \begin{array}{c|c|c|c|c} \mathbf{0}_{n_S n_S} & \mathbf{0}_{n_S n_U} & \mathbf{0}_{n_S n_F} & \mathbf{0}_{n_S n_T} & \mathbf{0}_{n_S n_K} \\ \hline {}^U\mathbf{A}_S & \mathbf{0}_{n_U n_U} & \mathbf{0}_{n_U n_F} & \mathbf{0}_{n_U n_T} & \mathbf{0}_{n_U n_K} \\ \hline \mathbf{0}_{n_F n_S} & {}^F\mathbf{A}_U & \mathbf{0}_{n_F n_F} & \mathbf{0}_{n_F n_T} & \mathbf{0}_{n_F n_K} \\ \hline \mathbf{0}_{n_T n_S} & \mathbf{0}_{n_T n_U} & {}^T\mathbf{A}_F & \mathbf{0}_{n_T n_T} & {}^T\mathbf{A}_K \\ \hline {}^K\mathbf{A}_S & {}^K\mathbf{A}_U & \mathbf{0}_{n_K n_F} & \mathbf{0}_{n_K n_T} & \mathbf{0}_{n_K n_K} \end{array} \right] \end{matrix} \cdot$$

( $n_V \times n_V$ )

Die Ordnung der Matrix beträgt  $n_V \times n_V$  mit

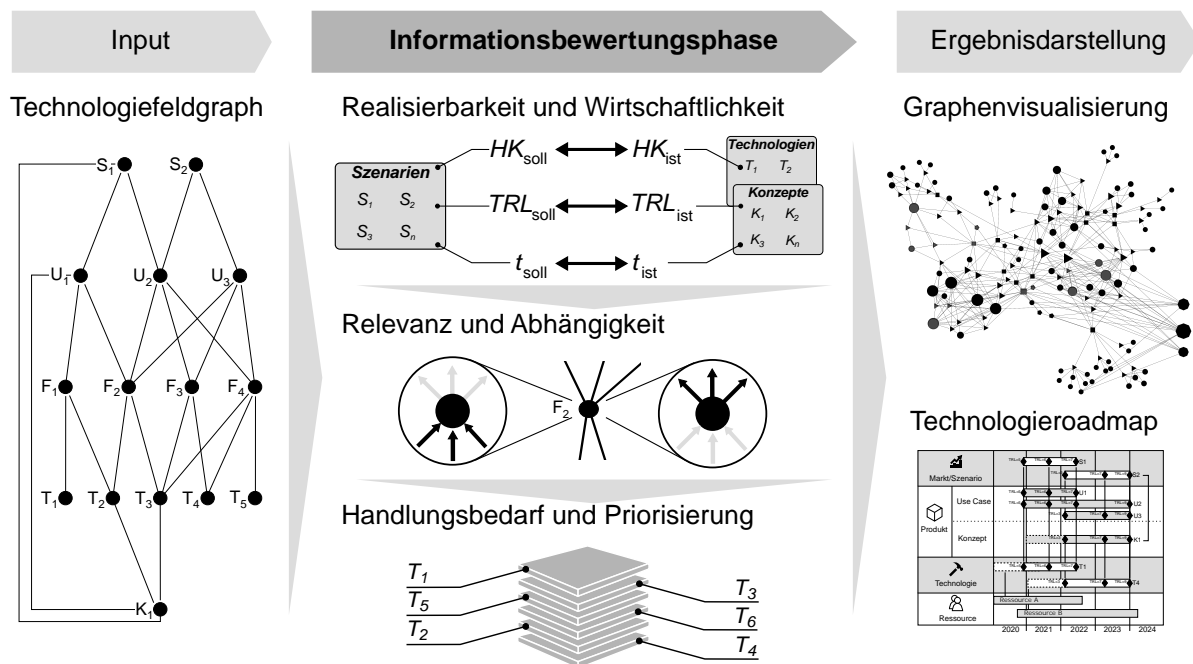
$$n_V = n_S + n_U + n_F + n_T + n_K \quad (5.4)$$

als Summe aller Knotenelemente des TFG. In der Adjazenzmatrix werden die Abhängigkeiten zwischen allen Knotenelementen über die Ebenen Szenarien ( $S_1, \dots, S_{n_S}$ ), Use Cases ( $U_1, \dots, U_{n_U}$ ), Funktionen ( $F_1, \dots, F_{n_F}$ ), Technologien ( $T_1, \dots, T_{n_T}$ ) und Konzepte ( $K_1, \dots, K_{n_K}$ ) des TFG beschrieben. Durch die Relationsmatrizen sind diese Abhängigkeiten definiert. Um eine quadratische Gesamtmatrix zu erhalten, werden die übrigen Segmente der Matrix mit Nullelementen  $\mathbf{0}_{nm}$ , entsprechend der Ordnung der jeweiligen Teilmatrix gefüllt.

Als Ergebnis der Informationsverarbeitungsphase steht ein Technologiefeldgraph zur Verfügung, der die Relationen zwischen den Elementen des Technologiefelds abbildet und durch Relationsmatrizen  ${}^U\mathbf{A}_S, \dots, {}^K\mathbf{A}_U$  und eine Adjazenzmatrix  $\mathbf{A}_{\text{ges}}$  beschreibt. Weiterhin sind durch das Datenschema die Knotenattribute des Graphen definiert und die für die Informationsbewertungsphase relevanten Kenngrößen in der Graphenstruktur hinterlegt. Als nächste Phase des Methodenansatz beschäftigt sich die Informationsbewertungsphase mit der Analyse des Technologiefeldgraphen und der Ableitung strategischer Handlungsempfehlungen.

## 5.4 Informationsbewertungsphase

Der Technologiefeldgraph repräsentiert die komplexen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen innerhalb eines Technologiefelds. Unter Anwendung der Analysemethoden der Graphentheorie (vgl. Abschnitt 4.2) werden im nächsten Schritt Handlungsempfehlungen für die strategische Technologieplanung abgeleitet. Der Fokus liegt auf der Technologieauswahl, der Bestimmung der technologischen Leistungsfähigkeit und des Technologietimings. Es soll einerseits die Frage beantwortet werden, welche Technologie zu welchem Zeitpunkt welchen technologischen Reifegrad erreichen muss, um die gestellten Anforderungen aus den Szenarien und Use Cases zu erfüllen (Market-Pull). Andererseits soll aufgezeigt werden, durch welche Technologieentwicklungen neue Szenarien und Use Cases realisierbar werden (Technology-Push). Die Ergebnisse werden im Anschluss in einer Technologieroadmap konsolidiert und können als Grundlage für die operative Technologieplanung sowie Technologieentwicklung genutzt werden. In Abbildung 5.13 ist der Ablauf der Informationsbewertungsphase mit den einzelnen Bewertungsstufen und den resultierenden Ergebnissen dargestellt.



**Abbildung 5.13:** Ablauf der Informationsbewertungsphase

Im TFG sind die Abhängigkeiten zwischen den Knoten durch Kanten beschrieben. Hierbei wird keine Unterscheidung zwischen technologischen, monetären oder zeitlichen Abhängigkeiten gemacht. Nach SEIDL kann in Projektportfolios zwischen leistungs-, termin- und kosten-technischen Abhängigkeiten zwischen Einzelprojekten unterschieden werden [157]. Um diese Unterscheidung auch in der Bewertung des TFG abbilden zu können, wird in der Informationsbewertungsphase eine getrennte Analyse von technologischen, monetären und zeitlichen Kenngrößen vorgenommen. Durch den attribuierten Graphen sind diese Kenngrößen in den Knoten hinterlegt (vgl. Abschnitt 5.3.1) und können unabhängig im Rahmen der Bewertung genutzt werden. Um ein besseres Verständnis für die Bewertungsphase zu erhalten, werden zunächst die Bewertungsgrößen vorgestellt, anhand derer der TFG untersucht wird.

Der Methodenansatz soll die Umsetzbarkeit zukünftiger Szenarien unter Berücksichtigung der Entwicklungsverläufe auf Technologieebene bewerten (vgl. Abschnitt 3.6). Aus diesem Grund soll mit dem Kriterium *Realisierbarkeit* die technologische Umsetzbarkeit aufgrund einer Reifegradbewertung der für ein Szenario relevanten Technologien bestimmt werden. Hierbei werden die Anforderungen der Szenarien mit den Eigenschaften der Technologien abgeglichen und so der frühestmögliche Umsetzungszeitpunkt bestimmt. Eine detaillierte Beschreibung erfolgt in Abschnitt 5.4.1. Neben der technologischen wird in Abschnitt 5.4.2 auch die monetäre Realisierbarkeit der Szenarien durch eine Betrachtung der *Wirtschaftlichkeit* untersucht. Hierbei werden ebenfalls die monetären Anforderungen der Szenarien mit den Eigenschaften der Technologien und Konzepten abgeglichen.

Die Ausgangsbasis für die Priorisierung von Technologieprojekten ist die Bestimmung der *Relevanz* und der *Abhängigkeit* der Knotenelemente. Hierbei wird bewertet, welchen Einfluss einzelne Elemente des TFG auf andere Elemente des Graphen haben bzw. wie stark die Knotenelemente durch andere beeinflusst werden und welche Bedeutung den Elementen zukommt. So kann z. B. ermittelt werden, welche Auswirkungen ein Zeitverzug bei der Technologieentwicklung auf die Realisierung der Szenarien haben kann. In Abschnitt 5.4.3 wird das Kriterium der Relevanz im Detail beschrieben, in Abschnitt 5.4.4 wird auf die Abhängigkeit eingegangen.

Auf Grundlage der Realisierbarkeits-, Wirtschaftlichkeits- sowie Relevanz- und Abhängigkeitsbewertung kann weiterhin die Gewichtung zukünftiger *Handlungsbedarfe* erfolgen. Diese werden durch das Kriterium der *Priorisierung* in ihrer strategischen Bedeutung bewertet. Hierbei wird ausgedrückt, wie bedeutsam beispielsweise eine Weiterentwicklung einer Technologie oder Funktion für das gesamte Technologiefeld ist. Somit können die zukünftigen Entwicklungsrichtungen definiert und eine Präferenzzuordnung für die Technologieprojekte erfolgen. In Abschnitt 5.4.5 erfolgt eine tiefergehende Beschreibung der Handlungsbedarfsbestimmung sowie des Kriteriums der Priorisierung.

Die Ergebnisdarstellung bildet den letzten Schritt der Informationsbewertungsphase. Die Ergebnisse werden in zwei unterschiedlichen Visualisierungsformen dargestellt. Einerseits werden in einer Graphendarstellung die Abhängigkeiten, Relevanzen und Priorisierungen dargestellt. Hierbei ist auch die Darstellung dynamischer Entwicklungen der Bewertungskenngrößen möglich. Diese Form der Ergebnisdarstellung wird in Abschnitt 5.4.6 beschrieben. Andererseits können die Ergebnisse der Informationsbewertungsphase in eine Technologieroadmap überführt werden. Hierbei wird die zeitliche Staffelung von Handlungssträngen über die Dimensionen Märkte, Produkte und Technologien sowie deren Abhängigkeiten dargestellt. In dieser Form werden die fünf Ebenen des TFG in die Dimensionen einer Technologieroadmap projiziert und in eine vereinfachte Darstellungsform zur Verbesserung der Übersichtlichkeit gebracht. In Abschnitt 5.4.7 ist dieser Schritt beschrieben.

#### 5.4.1 Realisierbarkeit

Das Bewertungskriterium *Realisierbarkeit* zielt darauf ab, die Umsetzbarkeit von neuen Szenarien in einer frühen Phase des Technologiefelds zu bewerten. Hierdurch wird abgeschätzt, welche Anwendungsfälle durch die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Technologien und Konzepte realistisch sind und an welchen Stellen eine weitere Technologieentwicklung nötig ist, um die marktseitigen Anforderungen zu erfüllen.

Das Kriterium der Realisierbarkeit kann in drei Ebenen unterteilt werden. Zunächst lässt sich eine *zeitliche* Realisierbarkeit bewerten und die Fragestellung nach einer termingerechten Umsetzung der Szenarien beantworten. Weiterhin kann die *technologische* Realisierbarkeit der Szenarien bewertet werden. In diesem Fall wird der technologische Reifegrad der eingesetzten Technologien mit den gesetzten Anforderungen der Szenarien abgeglichen. Zuletzt kann die *wirtschaftliche* Realisierbarkeit bewertet werden und die Forderung nach einer Umsetzung der Szenarien innerhalb des gesetzten Kostenrahmens überprüft werden.

Diese Bewertung wird im Rahmen der Wirtschaftlichkeit in Abschnitt 5.4.2 betrachtet. Es ist jedoch zu beachten, dass zeitliche, technologische und monetäre Realisierbarkeit nicht unabhängig voneinander sind [157]. So reduzieren sich beispielsweise im Verlauf der Zeit die Kosten für den Einsatz einer Technologie, und die Erfüllung der monetären Szenarioanforderungen muss als zeitlich abhängige Kenngröße gesehen werden. Gleiches gilt für die Bewertung der technologischen Realisierbarkeit. Durch die fortschreitende Technologieentwicklung ändert sich der Reifegrad einer Technologie, die Erfüllung der technologischen Anforderungen eines Szenarios ist ebenfalls zeitabhängig zu bewerten. Aus diesem Grund werden bei der Bewertung der technologischen Realisierbarkeit und der Wirtschaftlichkeit die Kenngrößen zeitabhängig betrachtet, die Bewertung der zeitlichen Realisierbarkeit erfolgt implizit. Im weiteren Verlauf des Abschnitts wird deshalb auch auf die explizite Betrachtung der zeitlichen Realisierbarkeit verzichtet.

Weiterhin wird im Methodenansatz zwischen der *theoretischen Realisierbarkeit* und *praktischen Realisierbarkeit* von Szenarien unterschieden. Die Differenzierung erfolgt über das Vorhandensein einer Relation zwischen dem Szenario und einem Konzept. Ist im TFG über die Relationsmatrix  ${}^K A_S$  eine Verknüpfung zwischen einem Szenario und einem Konzept vorhanden, wird von einer praktischen Realisierbarkeit gesprochen, da bereits eine konkrete Produktentwicklung erfolgt. Findet sich keine Relation zu einem Konzept, lässt sich ausschließlich die theoretische Realisierbarkeit bewerten. Hierbei erfolgt ein Abgleich zwischen den Anforderungen der Szenarien und den Eigenschaften der für dieses Szenario relevanten Technologien. Somit kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob die Kennwerte der Technologien eine theoretische Umsetzung zulassen.

**Theoretische Realisierbarkeit** Eine Bewertung der theoretischen technologischen Realisierbarkeit setzt voraus, dass Soll-Eigenschaften von Szenarien, Ist-Eigenschaften von Technologien sowie die Verknüpfung zwischen den Elementen bekannt sind. Durch die Steckbriefe ist der geforderte Technologiereifegrad  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^S(S, t)$  zum Zeitpunkt  $t_k$  für die Szenarien  $S = S_1, \dots, S_{n_s}$  als Wunschanforderung definiert (vgl. Abschnitt 5.2.1). Ferner ist der realistische Reifegrad  $\mathbf{TRL}_{\text{real}}^T(T, t)$  der Technologien  $T = T_1, \dots, T_n$  zum Zeitpunkt  $t_k$ , den die Technologien des Technologiefelds besitzen, bekannt (vgl. Abschnitt 5.2.3). Durch die Relationsmatrizen bzw. die Adjazenzmatrix  $A_{\text{ges}}$  ist der TFG definiert. Jedoch sind keine direkten Kanten zwischen Technologien und Szenarien beschrieben. Es besteht lediglich eine indirekte Verbindung zwischen den Technologien und Szenarien über die Zwischenebenen der Use Cases und Funktionen.

Die Ebene der Funktionen wird für die Bewertung der technologischen Realisierbarkeit genutzt. Zunächst wird bestimmt, welche Anforderungen an den Reifegrad der Use Cases aus den Szenarien resultieren. Der Tensor  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{US}}(U, S, t)$  definiert, welche Reifegradanforderung das Szenario



$S_i$  an den Use Case  $U_j$  zum Zeitpunkt  $t_k$  stellt. Die Anforderungen folgen den TRL-Stufen von 1 bis 9 in Anlehnung an Abschnitt 5.2.1. Hierbei gilt:

$$\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{US}}(U_j, S_i, t_k) = \left\{ \mathbf{TRL}_{\text{gef}}^S(S_i, t_k) \mid {}^U\mathbf{A}_S(U_j, S_i) = 1 \right\}. \quad (5.5)$$

Im nächsten Schritt gilt es zu bestimmen, welche Anforderungen an den Technologiereifegrad der Funktionen durch die Szenarien gestellt werden. Zunächst muss die indirekte Relation  ${}^F\mathbf{A}_S$  zwischen den Szenarien und Funktionen bestimmt werden. Die indirekte Relationsmatrix ergibt sich aus  ${}^F\mathbf{A}_S = {}^F\mathbf{A}_U \cdot {}^U\mathbf{A}_S$  und einer anschließenden Binarisierung der Matrix nach folgendem Schema:

$${}^F\mathbf{A}_S = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \text{ mit } a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{falls } {}^F\mathbf{A}_S(i, j) > 1, \\ 0, & \text{falls } {}^F\mathbf{A}_S(i, j) < 1. \end{cases} \quad (5.6)$$

Die Matrix gibt an, ob ein Weg zwischen der Funktion  $F_l$  und dem Szenario  $S_i$  auf dem Technologiefeldgraphen  $G$  existiert. Durch die Anwendung auf Gleichung 5.5 lässt sich der aus den Szenarien geforderte Reifegrad auf die Funktionsebene projizieren und es ergibt sich der Tensor, für den gilt:

$$\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{FS}}(F_l, S_i, t_k) = \left\{ \mathbf{TRL}_{\text{gef}}^S(S_i, t_k) \mid {}^F\mathbf{A}_S(F_l, S_i) = 1 \right\}. \quad (5.7)$$

Durch den Tensor  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{FS}}(F, S, t)$  wird beschrieben, welcher Technologiereifegrad von welchem Szenario  $S_i$  zum Zeitpunkt  $t_k$  für die Funktion  $F_l$  gefordert wird. Somit sind die Anforderungen der Szenarien auf Funktionsebene bekannt. Im nächsten Schritt gilt es, diese Anforderungen mit den realistischen Technologiereifegraden abzugleichen.

Durch  $\mathbf{TRL}_{\text{real}}^T(T, t)$  ist der erreichbare Technologiereifegrad einer Technologie  $T_m$  zum Zeitpunkt  $t_k$  definiert. Durch die Relationsmatrix  ${}^T\mathbf{A}_F$  ist es möglich, auf den realistischen Reifegrad der adjazenten Funktionen zu schließen. Der maximale Reifegrad einer adjazenten Technologie definiert den realistischen Reifegrad einer Funktion. Dies beruht auf der Annahme, dass die Technologie mit dem höchsten Reifegrad für die Realisierung einer Funktion eingesetzt wird. Diese Annahme ist zulässig, solange noch keine Konzeptentwicklung bzw. Technologieauswahl stattgefunden hat. Analog zu Gleichung 5.5 lässt sich der realistische Technologiereifegrad der Funktion  $F_l$  in Abhängigkeit der eingesetzten Technologie  $T_m$  zum Zeitpunkt  $t_k$  durch den Tensor

$$\mathbf{TRL}_{\text{theo}}^{\text{FT}}(F_l, T_m, t_k) = \left\{ \mathbf{TRL}_{\text{real}}^T(T_m, t_k) \mid {}^T\mathbf{A}_F(T_m, F_l) = 1 \right\} \quad (5.8)$$

bestimmen. Mit der zeilenweisen Bestimmung der maximalen Einträge können die realistischen Reifegrade der Funktionen  $\mathbf{TRL}_{\text{theo}}^F(F, t)$  zum Zeitpunkt  $t_k$  bestimmt werden zu:

$$\mathbf{TRL}_{\text{theo}}^F(F_l, t_k) = \max_{\forall T_m \in T} \left\{ \mathbf{TRL}_{\text{theo}}^{\text{FT}}(F_l, T_m, t_k) \right\}. \quad (5.9)$$

Auf Grundlage von Gleichung 5.7 und Gleichung 5.9 kann abschließend ein Abgleich der Technologiereifegrade und eine Bewertung der Szenarien in Hinblick auf die theoretische technologische Realisierbarkeit vorgenommen werden. Durch  $\mathbf{TRL}_{\text{theo}}^F(F, t)$  ist der maximal realisierbare Technologiereifegrad definiert, wohingegen  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{FS}}(F, S, t)$  den geforderten Reifegrad für die Funktionen und Szenarien beinhaltet. Ist der geforderter Reifegrad für das Szenario  $S_i$  in allen

Funktionen  $(F_1, \dots, F_l) \subseteq F$  des Szenarios kleiner oder gleich dem realisierbaren Technologiereifegrad zum Zeitpunkt  $t_k$ , kann das Szenario als realisierbar gewertet werden. In diesem Fall gilt:

$$\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{FS}}(F_l, S_i, t_k) \leq \mathbf{TRL}_{\text{theo}}^{\text{F}}(F_l, t_k) \forall F_l \in F. \quad (5.10)$$

Darüber hinaus ist eine detaillierte Bewertung individueller technologischer Kenngrößen wie die Witterungs- oder Temperaturbeständigkeit nur dann möglich, wenn sowohl die Szenarioknoten als auch die Technologieknoten des Graphen mit den entsprechenden Attributen beschrieben sind. Da dies nicht automatisiert durch den Abgleich quantitativer Werte (vgl. Abschnitt 5.2) erfolgen kann, muss für die Bewertung der Realisierbarkeit in Hinblick auf konkrete, technische Kenngrößen manuell erfolgen. Der TFG unterstützt in diesem Fall bei der Zuordnung von Anforderungen zu den technologischen Leistungsmerkmalen.

**Praktische Realisierbarkeit** Für eine Bewertung der praktischen Realisierbarkeit ist die Voraussetzung, dass für alle adjazenten Use Cases  $U_1, \dots, U_j$  des Szenarios eine direkte Relation zu einem Konzept besteht. Somit existiert eine Untermenge  $\{K_1, \dots, K_n\} \in K$  aus Konzepten oder Produkten, die für die Realisierung des Szenarios in Frage kommen. Jedoch gilt es an dieser Stelle wieder den technologischen Reifegrad abzugleichen und zu bestimmen, inwieweit die Szenarioanforderungen erfüllt werden können. Durch  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{S}}(S, t)$  ist bereits der geforderte Reifegrad auf der Szenarioebene bekannt.

Durch die Steckbriefe und die Überführung in das Datenschema ist ebenfalls der realistische Reifegrad der Konzepte zum Zeitpunkt  $t_k$  durch die Matrix  $\mathbf{TRL}_{\text{real}}^{\text{K}}(K, t)$  bekannt (vgl. Abschnitt 5.3.1). Die Relationsmatrix  ${}^{\text{K}}\mathbf{A}_{\text{S}}$  kann an dieser Stelle nicht für die Bestimmung der praktischen Realisierbarkeit herangezogen werden. Durch die Matrix ist lediglich definiert, welches Konzept auf welches Szenario ausgerichtet ist, jedoch nicht, ob alle adjazenten Use Cases adressiert werden. Aus diesem Grund wird über die Relationsmatrix  ${}^{\text{K}}\mathbf{A}_{\text{U}}$  zunächst der realistische Reifegrad der Use Cases bestimmt. Die Reifegrade der Konzepte werden hierzu auf die Ebene der Use Cases projiziert und über alle Konzepte der maximal erreichbare Reifegrad für einen Use Case  $U_j$  zum Zeitpunkt  $t_k$  bestimmt. Die  $n_{\text{U}} \times t$  Matrix folgt dem Schema:

$$\mathbf{TRL}_{\text{real}}^{\text{U}}(U_j, t_k) = \max_{\forall K_o \in K} \{ \mathbf{TRL}_{\text{real}}^{\text{K}}(K_o, t_k) \mid {}^{\text{K}}\mathbf{A}_{\text{U}}(K_o, U_j) = 1 \}. \quad (5.11)$$

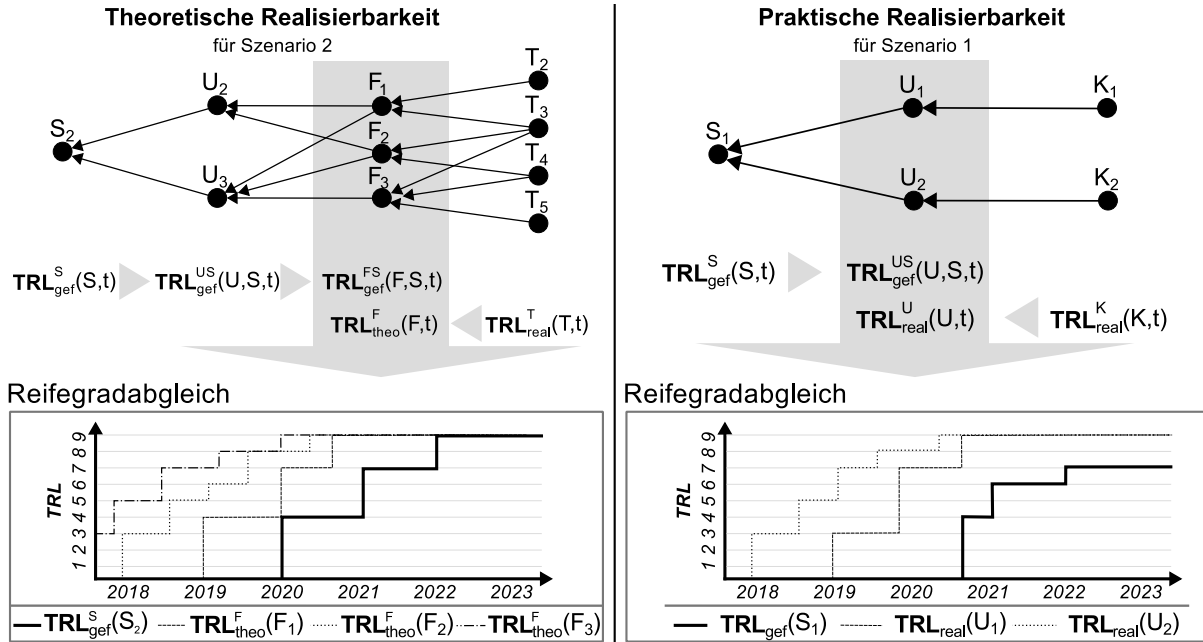
Hier kann der direkte Abgleich mit den geforderten Reifegraden  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{US}}(U, S, t)$  der Szenarien erfolgen und aufgrund der Reifegraddifferenzen die praktische Realisierbarkeit für ein Szenario bestimmt werden. Durch  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{US}}(U, S, t)$  ist definiert, welcher Reifegrad durch ein Szenario  $S_i$  für einen Use Case  $U_j$  zum Zeitpunkt  $t_k$  gefordert wird. Gilt für ein Szenario  $S_i$  zum Zeitpunkt  $t_k$ , dass

$$\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{US}}(U_j, S_i, t_k) \leq \mathbf{TRL}_{\text{real}}^{\text{U}}(U_j, t_k) \forall U_j \in U, \quad (5.12)$$

so kann das Szenario als praktisch realisierbar bewertet werden, da Konzepte mit einem ausreichenden Reifegrad zur Verfügung stehen, um alle Use Cases des Szenarios zu bedienen.

In Abbildung 5.14 ist der Ablauf der Realisierbarkeitsbewertung an einem vereinfachten Beispiel dargestellt. Es wird die Bewertung der theoretischen und der praktischen Realisierbarkeit veranschaulicht. Für den TFG wird ein Ausschnitt des Graphen aus Abbildung 5.12 verwendet. Im oberen Bereich der Darstellung sind die entsprechenden Teilgraphen dargestellt.

Der linke Teil der Abbildung beschreibt die Bewertung der theoretischen Realisierbarkeit. Die Matrix  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^S(S, t)$  wird im Rahmen der Bewertung der theoretischen Realisierbarkeit für Szenario S2 über die Ebene der Use Cases auf die Funktionsebene für die Funktionen  $F_1$  bis  $F_3$  projiziert und dort durch  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{FS}(F, S, t)$  beschrieben.



**Abbildung 5.14:** Ablauf der Realisierbarkeitsbewertung

Von der anderen Seite des TFG wird aus den Technologien  $T_2$  bis  $T_5$  der realisierbare Reifegrad für die Funktionen definiert. Durch den Abgleich mit der Matrix  $\mathbf{TRL}_{\text{theo}}^F(F, t)$  und die Betrachtung über den Zeitverlauf ergibt sich der dargestellte Reifegradverlauf auf der Funktionsebene. Dargestellt ist der geforderte Reifegrad des Szenarios im Abgleich mit dem realistischen Reifegrad der Funktionen  $F_1$  bis  $F_3$ . Erkennbar ist, dass alle Funktionen zu einem frühen Zeitpunkt die Reifegradanforderungen überschreiten und das Szenario als theoretisch realisierbar bewertet werden kann.

Im rechten Bereich der Grafik ist die Bewertung der praktischen Realisierbarkeit dargestellt. Zunächst wird analog zur Bewertung der theoretischen Realisierbarkeit der geforderte Reifegrad der Use Cases in Abhängigkeit von den Szenarien bestimmt. Die Matrix  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{US}(U, S, t)$  beschreibt, welchen Reifegrad ein Use Case in welchem Szenario erfüllen muss. Aus der Konzeptebene des TFG wird über die Adjazenzmatrix der konzeptseitig erreichbare Reifegrad bestimmt und durch  $\mathbf{TRL}_{\text{real}}^U(U, t)$  beschrieben. Durch den Reifegradabgleich der Matrizen ist erkennbar, dass die Reifegrade der Use Cases  $\mathbf{TRL}_{\text{real}}^U(U_1)$  und  $\mathbf{TRL}_{\text{real}}^U(U_2)$  die Anforderungen von Szenario  $S_1$  übertreffen. Das Szenario kann als praktisch realisierbar bewertet werden.

#### 5.4.2 Wirtschaftlichkeit

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit hat zum Ziel, die monetäre Umsetzbarkeit eines Szenarios zu bewerten und stellt hierzu den Mitteleinsatz der Zielerfüllung gegenüber. Bei der Bewertung der

Wirtschaftlichkeit wird ebenfalls zwischen der theoretischen und praktischen Wirtschaftlichkeit differenziert. Die Unterscheidung wird wiederum durch das Vorhandensein eines Konzepts zur Adressierung eines Szenarios vorgenommen. Ferner sind die geforderten Kosten der Szenarien als zeitlich abhängige Größe zu beschreiben, um im späteren Verlauf der Bewertung einen Abgleich mit der Kostenentwicklung der Konzepte und Technologien zu ermöglichen. Durch den Steckbrief sind die geforderten Kosten  $HK_{\text{gef}}^S(S)$  der Szenarien bekannt. Diese Kostenforderung gilt es zu dem Zeitpunkt zu erfüllen, zu dem erstmalig eine Reifegradanforderung für das Szenario existiert. Entsprechend lassen sich die Kostenanforderungen der Szenarien als zeitabhängige Größen beschreiben. Durch Normalisierung der Matrix  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^S(S, t)$  und elementweise Multiplikation mit den Anforderungen der Szenarien ergibt sich die  $n_S \times t$  Matrix mit den geforderten Kosten. Für die Matrix  $\mathbf{HK}_{\text{gef}}^S(S, t) = [a_{ik}]$  gilt:

$$a_{ik} = \begin{cases} HK_{\text{gef}}^S(S_i), & \text{falls } \mathbf{TRL}_{\text{gef}}^S(S_i, t_k) \geq 1, \\ 0, & \text{falls } \mathbf{TRL}_{\text{gef}}^S(S_i, t_k) = 0. \end{cases} \quad (5.13)$$

Die Matrix  $\mathbf{HK}_{\text{gef}}^S(S, t)$  gibt hierbei an, welche Kostenanforderungen das Szenario  $S_i$  zum Zeitpunkt  $t_k$  stellt. Auf Grundlage dieser Matrix kann für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ein Abgleich mit den technologieseitig erreichbaren Kosten erfolgen. Nachfolgend wird die Bewertung der theoretischen und praktischen Wirtschaftlichkeit beschrieben.

**Theoretische Wirtschaftlichkeit** Die Bewertung der theoretischen Wirtschaftlichkeit folgt im Gegensatz zur Realisierbarkeit keinem stringenten Verfahren, da die Komplexität bei einer Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Szenarien größer ist. Dies resultiert zum einen daraus, dass eine Bewertung stark von den jeweiligen antizipierten Geschäftsmodellen abhängig ist und durch entsprechende Experten unterstützt werden muss. Zum anderen ist eine Kostenabschätzung für den Einsatz einer Technologie umsetzungsspezifisch und kann nicht allgemeingültig bewertet werden. Aus diesem Grund ist insbesondere in frühen Phasen wie der strategischen Technologieplanung, in denen noch keine konkrete Konzeptidee vorhanden ist, eine monetäre Bewertung nicht pauschalisierbar und muss durch den Einsatz von Expertenwissen erfolgen [151].

In diesem Fall unterstützt der TFG dabei, die für ein Szenario relevanten Technologien zu identifizieren und eine Kostenabschätzung für ein potenzielles Konzept oder Produkt durchzuführen. Innerhalb des Technologiefeldgraphen sind die für ein Szenario relevanten Funktionen durch  ${}^F\mathbf{A}_S$  bekannt (vgl. Gleichung 5.6). Die Matrix definiert, welche Funktionen  $F$  für ein Szenario  $S_i$  realisiert werden müssen. Die theoretischen monetären Aufwände für die Realisierung der Funktionen werden durch die eingesetzten Technologien definiert (vgl. Abschnitt 3.1.2). Durch Bestimmung der adjazenten Technologieknoten  $T_1, \dots, T_n \subseteq T$  können die szenariorelevanten Technologien bestimmt werden. Hierbei ist zu beachten, dass nicht alle adjazenten Technologien für die Realisierung des Szenarios zum Einsatz kommen müssen, da Wechselwirkungen und Synergien zwischen den Technologien bestehen können und eine Technologie ggf. in der Lage ist, mehrere Funktionen zu realisieren. Auf Grundlage der szenariorelevanten Technologien können jedoch eine vorläufige Kostenabschätzung und der Abgleich mit den monetären Randbedingungen  $\mathbf{HK}_{\text{gef}}^S(S, t)$  der Szenarien erfolgen.

**Praktische Wirtschaftlichkeit** Für die Bewertung der praktischen Wirtschaftlichkeit kann nicht auf die Relationsmatrix  ${}^K\mathbf{A}_S$  zurückgegriffen werden. Diese beschreibt zwar, welche Konzepte welche Szenarien adressieren, jedoch lässt die Matrix keine Aussage darüber zu, welche Konzepte benötigt werden, um ein Szenario zu realisieren. Unter Umständen müssen mehrere Konzepte miteinander kombiniert werden, um ein Szenario zu realisieren. Somit kann eine Wirtschaftlichkeitsbewertung hierauf nicht aufbauen. Bei der Bewertung für ein Szenario wird deshalb auf ein zweistufiges Verfahren zurückgegriffen. Zunächst werden die Kosten der Konzepte auf die Ebene der Use Cases projiziert. Somit kann eine Aussage darüber getroffen werden, welcher Use Cases durch welches Konzept zu welchen Kosten realisiert werden kann. Die Matrix ergibt sich zu:

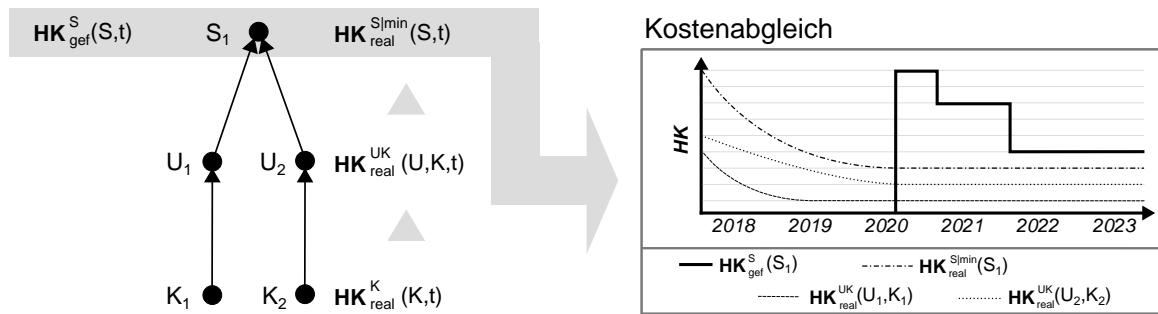
$$\mathbf{HK}_{\text{real}}^{\text{UK}}(U_j, K_o, t_k) = \{ \mathbf{HK}_{\text{real}}^K(K_o, t_k) \mid {}^K\mathbf{A}_U(K_o, U_j) = 1 \}. \quad (5.14)$$

Für jedes Szenario gilt es, die Summe über die adjazenten Use Cases zu bilden. Voraussetzung ist, dass die Konzepte den Reifegradanforderungen des Szenarios entsprechen und eine inzidente Kante zwischen dem Konzept und den Use Cases des Szenarios besteht. Entsprechend ergeben sich die minimal realisierbaren Kosten für die Ebene der Szenarien zu:

$$\mathbf{HK}_{\text{real}}^{S|\min}(S_i, t_k) = \quad (5.15)$$

$$\sum_{j=1}^{n_U} \left\{ \min_{\forall K_o \in K} \left\{ \mathbf{HK}_{\text{real}}^{\text{UK}}(U_j, K_o, t_k) \mid \mathbf{TRL}_{\text{gef}}^S(S_i, t_k) \leq \mathbf{TRL}_{\text{real}}^K(K_o, t_k), {}^U\mathbf{A}_S(U_j, S_i) = 1 \right\} \right\}.$$

Die Matrix gibt an, welche Kosten für ein Szenario  $S_i$  zum Zeitpunkt  $t_k$  auf Basis der Konzepte minimal möglich sind. Auf Grundlage dieser Matrix kann ein Abgleich mit den monetären Anforderungen aus den Szenarien  $\mathbf{HK}_{\text{gef}}^S(S, t)$  erfolgen und es lässt sich beispielsweise der Zeitpunkt bestimmen, zu dem die geforderten Kosten eines Szenarios durch die realen Kosten unterschritten werden.



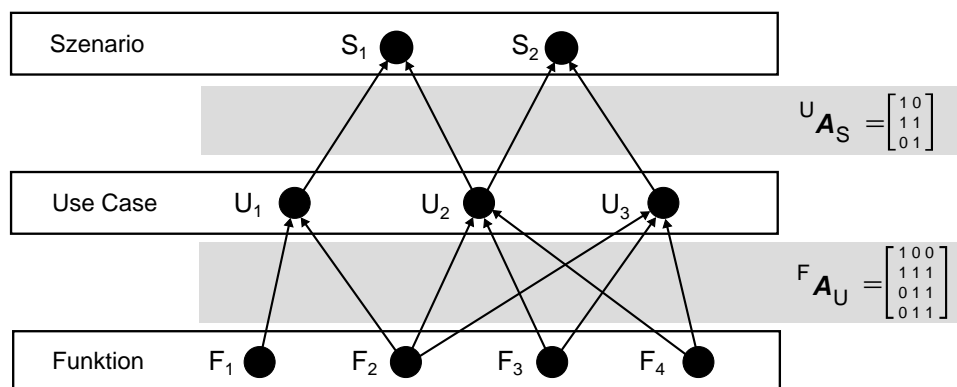
**Abbildung 5.15:** Ablauf der praktischen Wirtschaftlichkeitsbewertung

Um die Zusammenhänge zu verdeutlichen, ist in Abbildung 5.15 der Ablauf der praktischen Wirtschaftlichkeitsbewertung zusammengefasst. Im Rahmen des Methodenansatzes ist eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung lediglich auf der Ebene des Szenarios bzw. der Konzepte sinnvoll, da ein direkter Abgleich von Soll- mit Ist-Anforderungen erfolgen kann. Für die weiteren Ebenen des TFG findet keine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung statt, da eine Ableitung von Kostenforderungen für die Use Case- und Funktionsebene nicht zielführend ist. In Rahmen von Abbildung 5.15 ist die Bewertung der praktischen Realisierbarkeit an einem beispielhaften TFG dargestellt. Durch die Informationsbeschaffungsphasen sind die realistischen Kosten für Konzept  $K_1$  und Konzept  $K_2$  durch  $\mathbf{HK}_{\text{real}}^K(K, t)$  bekannt. Über die Transformation und Minimalwertbestimmung nach

Gleichung 5.15 lassen sich die erreichbaren Kosten für das Szenario bestimmen. Ein Abgleich mit den szenarioseitig gesetzten Anforderungen ergibt den dargestellten Verlauf. In der Abbildung sind die geforderten Kosten des Szenarios  $\mathbf{HK}_{\text{gef}}^S(S_1, t)$  im Verhältnis zu den realistischen Kosten dargestellt. Die realistischen Kosten für das Szenario ergeben sich aus den Einzelkosten der Use Cases und sind durch  $\mathbf{HK}_{\text{real}}^{S|\min}(S_1, t)$  beschrieben. Zum besseren Verständnis sind deshalb auch die Einzelkosten der Use Cases  $U_1$  und  $U_2$  dargestellt.

### 5.4.3 Relevanz

Die Relevanzbewertung ist an die Bewertungen der Wechselwirkungsanalyse angelehnt (vgl. Abschnitt 3.4), verfolgt jedoch eine erweiterte Zielsetzung. Im Rahmen der Relevanzbewertung soll eine Aussage darüber getroffen werden, welche Bedeutung die einzelnen Elemente des TFG aufgrund der aktiven Beeinflussung anderer Knotenelemente besitzen. So kann beispielsweise gewichtet werden, welche Technologien eine besondere Rolle innerhalb eines Themenkomplexes einnehmen und in der Planung von Entwicklungsaktivitäten zu priorisieren sind. Die Bewertung ist angelehnt an die Mikroanalyse der Graphentheorie (vgl. Abschnitt 4.2.1). Anhand eines Beispiels, dargestellt in Abbildung 5.16, lässt sich die Zielstellung der Relevanzbewertung verdeutlichen.



**Abbildung 5.16:** Vereinfachter Aufbau der Relevanzbewertung

Durch die Szenarien und Use Cases des TFG ist das Technologiefeld marktseitig beschrieben. Ferner sind die Use Cases in ihrer funktionalen Struktur beschrieben (vgl. Abschnitt 5.3). Über den TFG ist definiert, in wie vielen Use Cases eine bestimmte Funktion zum Einsatz kommt und ebenso in wie vielen Szenarien dieser Use Cases vorgesehen sind. Ist eine Funktion, wie beispielsweise Funktion  $F_2$ , für die Umsetzung besonders vieler Use Cases ( $U_1, U_2$  und  $U_3$ ) notwendig und sind zudem die Use Cases in vielen Szenarien ( $S_1$  und  $S_2$ ) gefordert, kann dieser Funktion eine höhere Relevanz als anderen Funktionen (z. B.  $F_1$ ) des TFG zugemessen werden. Entsprechend ist diese Funktion in den Entwicklungsaktivitäten besonders zu gewichten. Durch die Bestimmung der Relevanz können Fehlentscheidungen, beispielsweise bei der Budgetierung von Entwicklungsprojekten vermieden werden, indem die Aktivitäten auf Projekte verlagert werden, die eine hohe Bedeutung für die Entwicklung des gesamten Technologiefelds besitzen. Innerhalb des TFG findet eine Relevanzbewertung getrennt für jede Hierarchieebene statt, um unterschiedliche Fragestellungen adressieren zu können. Von der Relevanzbewertung ist die Ebene der Szenarien ausgenommen. Die Relevanz der Szenarien wird durch die Technologiestrategie

definiert (vgl. Abschnitt 3.3.1) und ist als externe Größe zu betrachten, mit der das Technologiefeld entsprechend der Unternehmensausrichtung gesteuert wird und zu anderen Technologiefeldern synchronisiert wird. Entsprechend kann durch die Vorgaben auf Szenarioebene eine generelle Ausrichtung des Technologiefelds erfolgen. Die Relevanzbewertung auf Szenarioebene trifft eine Aussage darüber, welche Szenarien aus Unternehmenssicht besonders wichtig sind und somit bevorzugt zu realisieren sind. Während der Bewertung wird zudem zwischen der einfachen, kumulierten und der normalisierten Relevanzbewertung unterschieden. Bei der Bewertung der *einfachen Relevanz* findet eine isolierte Betrachtung der Ebenen statt und die Elemente werden aufgrund ihres jeweiligen Knotenausgangsgrads  $d_G^+(v)$  (vgl. Abschnitt 4.2) ins Verhältnis zu anderen Elementen der Hierarchieebene gesetzt. So wird z. B. aufgezeigt, welche Funktionen eine übergeordnete Rolle in der Umsetzung von Use Case spielen, da ihre Umsetzung für eine hohe Anzahl von Use Cases vorausgesetzt wird.

Bei der Bewertung der *kumulierten Relevanz* werden hingegen auch die individuellen Relevanzen der adjazenten Knoten in die Bewertung mit einbezogen. Somit findet eine Bewertung im Gesamtkontext des TFG statt und es kann die Bedeutung der einzelnen Knotenelemente für das gesamte Technologiefeld bestimmt werden. So kann z. B. eine Aussage darüber getroffen werden, welche Bedeutung eine Funktion für die Weiterentwicklung des gesamten Technologiefelds hat. Diese Art der Bewertung weist Ähnlichkeiten zum Vorgehen des analytischen Hierarchieprozesses nach Saaty [140] auf, welcher eine hierarchische Strukturierung von Entscheidungsproblemen verfolgt. Im Gegensatz zu diesem Vorgehen bietet der TFG jedoch die Möglichkeit, dynamische Änderungen und multiple Abhängigkeiten zu beschreiben. Mit der *normalisierten Relevanz* kann ferner für die unteren Ebenen des TFG (Funktion, Technologie, Konzept) der Einfluss der Elemente auf die Szenarioebene abgeleitet und abgeschätzt werden, welche Bedeutung die Elemente für eine Erreichung übergeordneter Zielsetzungen haben. Da die Relevanz als dynamische Kenngröße betrachtet wird, können zudem Änderungsvorgänge und Umverteilungen von Relevanzen erkennbar gemacht werden. Im weiteren Verlauf des Abschnitts werden die Möglichkeiten der Relevanzbewertung für die fünf Ebenen des TFG beschrieben.

**Szenario** Durch die Szenariosteckbriefe und die hieraus abgeleitete Matrix für die geforderten Reifegrade im Zeitverlauf  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^S(S, t)$  ist bekannt, zu welchem Zeitpunkt der Ersteinsatz des Szenarios erfolgen soll. Weiterhin ist die Relevanz der Szenarien aus den Steckbriefen in Form von  $Rel^S(S)$  bekannt. Für die Verwertung im Rahmen des Methodenansatzes müssen diese in eine zeitabhängige Darstellung überführt werden. Durch die Binarisierung der Matrix  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^S(S, t)$  und elementweise Multiplikation mit der Relevanz der Szenarien aus den Steckbriefen ergibt sich der dynamische Verlauf für die Szenarien durch die  $n_S \times t$  Matrix  $\mathbf{REL}^S(S, t) = [a_{ik}]$ . Für diese gilt:

$$a_{ik} = \begin{cases} Rel^S(S_i), & \text{falls } \mathbf{TRL}_{\text{gef}}^S(S_i, t_k) \geq 1, \\ 0, & \text{falls } \mathbf{TRL}_{\text{gef}}^S(S_i, t_k) = 0. \end{cases} \quad (5.16)$$

Die Matrix gibt an, welche Relevanz das Szenario  $S_i$  zum Zeitpunkt  $t_k$  besitzt und stellt den Ausgangspunkt für die Berechnung der kumulierten Relevanzen der nachfolgenden Ebene des TFG dar. Entsprechend der Ordinalskala (vgl. Abschnitt 5.3.1) wird durch einen Matrixeintrag von 1 eine geringe Relevanz, durch 2 eine mittlere Relevanz und durch 3 eine hohe Relevanz dargestellt.

**Use Case** Mit der Relevanzbewertung auf Ebene der Use Cases wird bestimmt, wie viele (aktive) Szenarien ein Use Case adressiert. Aktive Szenarien weisen zum Zeitpunkt  $t_k$  eine Relevanz größer Null auf, werden also marktseitig aktiv gefordert. Die Berechnung beruht auf dem Konstrukt des Knotenausgangsgrads  $d_G^+(U_j)$ . Es werden jedoch ausschließlich solche Kanten berücksichtigt, deren Zielknoten zum Zeitpunkt  $t_k$  eine Relevanz größer Null aufweisen. Somit ergibt sich die Relevanz in Form der  $n_U \times t$  Matrix  $\mathbf{REL}^U(U, t)$ , wobei gilt:

$$\mathbf{REL}^U(U_j, t_k) = |\{ \{U_j, S_i\} \in E \mid \mathbf{REL}^S(S_i, t_k) > 0 \}|. \quad (5.17)$$

Die Matrix gibt an, wie viele Szenarien mit dem Use Case  $U_j$  zum Zeitpunkt  $t_k$  verknüpft sind, die eine Relevanz größer als Null besitzen. Die Kantenmenge  $E$  des Technologiefeldgraphen ist hierbei über die Adjazenzmatrix  $\mathbf{A}_{\text{ges}}$  (vgl. Abschnitt 5.3.3) definiert. Alternativ kann die Berechnung auch auf Grundlage der Relationsmatrix  ${}^U\mathbf{A}_S$  erfolgen.

Die Berechnung der kumulierten Relevanz baut auf diesem Vorgehen auf. In Anlehnung an die Berechnung von Knotengraden in gewichtete Graphen wird die Anzahl adjazenter (aktiver) Szenarien mit der jeweiligen Relevanz multipliziert und aufsummiert. Somit ergibt sich die kumulierte Relevanz zu:

$$\mathbf{REL}_{\text{kum}}^U(U_j, t_k) = \sum_{i=1}^{n_S} \mathbf{REL}^S(S_i, t_k) \forall \{U_j, S_i\} \in E. \quad (5.18)$$

Die  $n_U \times t$  Matrix gibt für das Szenario  $U_j$  zum Zeitpunkt  $t_k$  die Summe der adjazenten (aktiven) Szenariorelevanzen an. Durch Gleichung 5.17 lässt sich die einfache Relevanz der Use Cases über den Zeitverlauf bestimmen. Somit kann eine Aussage darüber getroffen werden, wie bedeutsam eine Umsetzung des Use Case für die Weiterentwicklung des Technologiefelds und die Realisierung der Szenarien sein kann. Es wird auch die Grundlage für die spätere Priorisierung durch den Vergleich der Relevanzen gelegt (vgl. Abschnitt 5.4.5). Besitzt ein Use Case eine besonders hohe (kumulierte) Relevanz, ist die Umsetzung und entsprechend die Konzeptentwicklung anderen Use Cases vorzuziehen. Darüber lässt sich mit Gleichung 5.18 und der Bestimmung der kumulierten Relevanz eine Gewichtung der Use Cases im Sinne der übergeordneten Technologiestrategie vornehmen.

**Funktion** Die Relevanzbewertung auf der Funktionsebene erfolgt analog zur Bewertung der Use Cases. Die einfache Relevanz der Funktion ist beschrieben durch die  $n_F \times t$  Matrix mit dem Aufbau:

$$\mathbf{REL}^F(F_l, t_k) = |\{ \{F_l, U_j\} \in E \mid \mathbf{REL}^U(U_j, t_k) > 0 \}|. \quad (5.19)$$

Die Matrix beschreibt, wie viele adjazente (aktive) Use Cases zum Zeitpunkt  $t_k$  für die Funktion  $F_l$  existieren. Analog zu Gleichung 5.18 ergibt sich die kumulierte Relevanz der Use Cases.  $\mathbf{REL}_{\text{kum}}^F(F_l, t_k)$  beschreibt für die Funktion  $F_l$  die kumulierte Relevanz zum Zeitpunkt  $t_k$ , indem die kumulierten Relevanzen der adjazenten Use Cases aufsummiert werden:

$$\mathbf{REL}_{\text{kum}}^F(F_l, t_k) = \sum_{j=1}^{n_U} \mathbf{REL}_{\text{kum}}^U(U_j, t_k) \forall \{F_l, U_j\} \in E. \quad (5.20)$$



Hierbei ist zu beachten, dass eine mehrfache Berücksichtigung der Szenariorelevanzen erfolgen kann. Die kumulierte Gewichtung beruht in ihrem Grundprinzip auf der externen Gewichtung der Szenarien. Jedoch kann innerhalb des Graphen eine Verzweigung erfolgen und die Existenz von mehreren Wegen  $P_1, \dots, P_n$  auf  $G$  ermöglicht werden, die eine Funktion  $F_l$  mit einem Szenario  $S_i$  verbinden. Somit können die Relevanzen indirekt mehrfach in die kumulierte Relevanzbewertung der Funktionen einfließen. Aus diesem Grund wird zusätzlich die *normalisierte Relevanz*  $\mathbf{REL}_{\text{norm}}^F(F_l, t_k)$  für die Funktionen bestimmt. Die normalisierte Relevanz gibt an, welche Anzahl von Szenarien eine Realisierung der entsprechenden Funktion  $F_l$  zum Zeitpunkt  $t_k$  voraussetzt. Die Berechnung der normalisierten Relevanz für die Funktionsebenen ergibt sich zu:

$$\mathbf{REL}_{\text{norm}}^F(F_l, t_k) = \sum_{i=1}^{n_s} \{S_i\} \mid \{F_l, \dots, S_i\} \in P \text{ auf } G. \quad (5.21)$$

Hierbei wird die Anzahl der Szenarien  $S$  bestimmt, die durch einen Weg  $P$  mit der Funktion  $F_l$  verbunden sind. Die Berechnung kann beispielsweise durch den Algorithmus von *Dijkstra* erfolgen, der den kürzesten Weg in einem gerichteten Graph zwischen zwei Knoten bestimmt [148]. Der Vergleich der kumulierten und normalisierten Relevanz kann zudem als Entscheidungsgrundlage für die spätere Priorisierung herangezogen werden (vgl. Abschnitt 5.4.5).

**Technologie** In Anlehnung an die Bewertungen auf Funktions- und Use Case-Ebene erfolgt die Relevanzbewertung der Technologien. Die Relevanzbewertung trifft eine Aussage darüber, welche Bedeutung einer Technologie in der Realisierung des Technologiefelds zuzumessen ist. Die Grundlage für diese Bewertung ist die Betrachtung adjazenter Funktionen sowie indirekt verbundener Use Cases und Szenarien. Darüber hinaus kann auf der Ebene der Technologien auch die sogenannte *reale Relevanz* bestimmt werden. Die reale Relevanz soll abschätzen, in wie vielen Konzepten die jeweilige Technologie zum Einsatz kommt. Während mit der theoretischen Relevanz insbesondere die zukünftige Entwicklungsrichtung im Sinne der strategischen Technologieplanung bestimmt wird, kann durch die reale Relevanz abgeschätzt werden, welche Kompetenzen in aktuellen Produkten oder Konzepten vorhanden sind oder benötigt werden. Die Bedeutung und Aussage der realen Relevanz wird im späteren Teil dieses Abschnitts vertieft.

Mit der Bestimmung der einfachen Relevanz wird die Anzahl der adjazenten (aktiven) Funktionsknoten bewertet. Als aktive Funktionsknoten gelten solche Knoten, deren geforderter Technologiereifegrad bzw. deren Relevanz zum Zeitpunkt  $t_k$  einen Wert größer Null aufweist. Die Relevanz für die Technologien ergibt sich zu:

$$\mathbf{REL}^T(T_m, t_k) = |\{ \{T_m, F_l\} \in E \mid \mathbf{REL}^F(F_l, t_k) > 0 \}|. \quad (5.22)$$

Die Matrix  $\mathbf{REL}^T(T, t)$  gibt an, welche einfache Relevanz die Technologie  $T_m$  zum Zeitpunkt  $t_k$  hat und bestimmt, welches Potenzial zur Funktionsrealisierung in einer Technologie steckt. Hierbei ist zu beachten, dass es sich um eine theoretische Relevanz handelt. Die praktische Anwendbarkeit der Technologie bedarf einer individuellen Bewertung unter den Randbedingungen der angestrebten Szenario-Use Case-Kombination. Diese Bewertung kann beispielsweise im Rahmen der Produktentwicklung erfolgen (vgl. Abschnitt 3.1.2). Der Technologiefeldgraph kann genutzt werden, um den Lösungsraum zu erweitern.

Die Berechnung der kumulierten Relevanz erfolgt analog zu den vorherigen Bewertungsschritten. Die kumulierte Relevanz der adjazenten Funktionsknoten wird für jeden Zeitschritt  $t_k$  aufsummiert und dem Technologieknoten zugeordnet. Somit ergibt sich in der  $n_S \times t$  Matrix der Relevanzverlauf über die Zeit nach dem Schema:

$$\mathbf{REL}_{\text{kum}}^T(T_m, t_k) = \sum_{l=1}^{n_F} \mathbf{REL}_{\text{kum}}^F(F_l, t_k) \forall \{T_m, F_l\} \in E. \quad (5.23)$$

Die kumulierte Relevanz berücksichtigt die externe Priorisierung der Szenarien sowie die Existenz mehrfacher Pfade  $P$  auf dem Technologiefeldgraph  $G$  zwischen einer Technologie  $T_m$  und den Szenarien  $S$ . In Anlehnung an die Bestimmung der normalisierten Relevanz der Funktionen lässt sich auch für die Technologieebene eine solche Bestimmung vornehmen. Durch die normalisierte Relevanz der Funktionen wird ausgedrückt, in wie vielen Szenarien die entsprechende Technologie potenziell zum Einsatz kommen kann. Somit lässt sich abschätzen, welche Bedeutung die Technologie für die zukünftige Entwicklung des Technologiefelds hat und wie bedeutsam ein Abbruch oder eine Verzögerung von Entwicklungsarbeiten an den Technologien sein kann. Die Berechnung der normalisierten Relevanz ergibt sich zu:

$$\mathbf{REL}_{\text{norm}}^T(T_m, t_k) = \sum_{i=1}^{n_S} \{S_i\} : \{T_m, \dots, S_i\} \in P \text{ auf } G. \quad (5.24)$$

Der Vergleich der normalisierten Relevanz mit der kumulierten Relevanz lässt eine Abschätzung über den Vernetzungsgrad zwischen der Technologie- und Szenarioebene zu und gibt Aufschluss darüber, wie hoch der Wiederverwendungswert einer Technologie ist. Ist die kumulierte Relevanz einer Technologie  $T_m$  deutlich höher als die normalisierte Relevanz, ist auf die Existenz mehrerer Wege  $P_1, \dots, P_n$  auf  $G$  zur Ebene der Szenarien zu schließen.

Da die Ebene der Technologien durch das Relationsmodell auch mit der Ebene der Konzepte verknüpft ist, kann zusätzlich die sogenannte *reale Relevanz* der Technologie bestimmt werden. Unter der realen Relevanz wird die Bedeutung der Technologien für die bestehenden Konzepte und Produkte innerhalb des TFG untersucht. Über die Bestimmung der adjazenten Konzepte bzw. Produkte wird abgeleitet, welche Einflussnahme eine Technologie für die praktische Umsetzung realer Systeme und zur produkttechnischen Adressierung von Szenarien und Use Cases hat. Hierbei erfolgt in der Bewertung eine Beschränkung auf unternehmensinterne Produkte und Konzepte  $K_{\text{intern}}$ . Somit wird die aktuelle und zukünftige Relevanz der Technologien für die Produkte und Konzepte des Unternehmens bestimmt. Externe Konzepte und Produkte werden in der Bewertung nicht berücksichtigt, jedoch können diese als Vergleich für die Konzeptentwicklung herangezogen werden.

$$\mathbf{REL}_{\text{real}}^T(T_m, t_k) = \sum_{o=1}^{n_K} \{T_m, K_o\} | K_o \in K_{\text{intern}} \quad (5.25)$$

Gleichung 5.25 stellt die Berechnung der realen Relevanz für die Technologieebene dar. Hierzu wird zu jedem Zeitpunkt  $t_k$  für die Technologien  $T$  die Anzahl der adjazenten unternehmensinternen Konzepte  $K$  aufsummiert. Die resultierende Matrix besitzt die Ordnung  $n_T \times t$  und beschreibt, in wie viele Konzepte die jeweilige Technologie  $T_m$  einfließt.

**Konzept** Bei der Relevanzbewertung der Konzepte wird ebenfalls zwischen der einfachen, kumulierten und normalisierten Relevanzbewertung unterschieden. In der einfachen Relevanz wird die Anzahl der adjazenten (aktiven) Use Cases zum Zeitpunkt  $t_k$  für das Konzept  $K_o$  bestimmt. Gleichung 5.26 beschreibt die Berechnung der  $n_K \times t$  Matrix.

$$\mathbf{REL}^K(K_o, t_k) = |\{ \{K_o, U_j\} \in E \mid \mathbf{REL}^U(U_j, t_k) > 0 \}| \quad (5.26)$$

Über die einfache Relevanz wird ausgedrückt, welche Bedeutung einem Konzept für die Umsetzung der Use Cases zukommt. Um die unterschiedlichen Relevanzen der Use Cases zu berücksichtigen, wird bei der Bestimmung der kumulierten Relevanzen zusätzlich zur Anzahl der adressierten Use Cases auch deren Relevanzgewichtung nach Gleichung 5.18 in der Bewertung einbezogen. Somit ergibt sich die  $n_K \times t$  Matrix zu:

$$\mathbf{REL}_{\text{kum}}^K(K_o, t_k) = \sum_{j=1}^{n_U} \mathbf{REL}_{\text{kum}}^U(U_j, t_k) \forall \{K_o, U_j\} \in E. \quad (5.27)$$

Die Matrix ermöglicht eine Aussage darüber, welche Bedeutung den Konzepten und Produkten des TFG in der Realisierung der Szenarien zugemessen werden kann. Die Bestimmung der normalisierten Relevanz der Konzepte bildet den Abschluss der Relevanzbewertung. Die normalisierte Relevanz der Konzepte kann durch die direkte Relation zwischen der Konzept- und Szenarioebene durch die Matrix  ${}^K\mathbf{A}_S$  und die Adjazenzmatrix  $\mathbf{A}_{\text{ges}}$  berechnet werden. Hierbei wird für jedes Konzept  $K_o$  die Anzahl der adjazenten (aktiven) Szenarien zum Zeitpunkt  $t_k$  aufsummiert:

$$\mathbf{REL}_{\text{norm}}^K(K_o, t_k) = |\{ \{K_o, S_i\} \in E \mid \mathbf{REL}^S(S_i, t_k) > 0 \}|. \quad (5.28)$$

Mit diesem Schritt endet die Relevanzbewertung und Einzelknoten können in ihrer Bedeutung für das Gesamttechnologiefeld bewertet werden.

**Tabelle 5.4:** Kenngrößenübersicht der Relevanzbewertung

Ebene	Verfolgte Fragestellung	Bewertungsmatrix
Szenario	Externe Gewichtung der Szenarien	$\mathbf{REL}^S(S, t)$
Use Case	Anzahl adressierter Szenarien	$\mathbf{REL}^U(U, t)$
	Summierte Relevanz adressierter Szenarien	$\mathbf{REL}_{\text{kum}}^U(U, t)$
Funktion	Anzahl adressierter Use Cases	$\mathbf{REL}^F(F, t)$
	Summierte Relevanz adressierter Use Cases	$\mathbf{REL}_{\text{kum}}^F(F, t)$
	Anzahl adressierter Szenarien	$\mathbf{REL}_{\text{norm}}^F(F, t)$
Technologie	Anzahl adressierter Funktionen	$\mathbf{REL}^T(T, t)$
	Summierte Relevanz adressierter Funktionen	$\mathbf{REL}_{\text{kum}}^T(T, t)$
	Anzahl adressierter Szenarien	$\mathbf{REL}_{\text{norm}}^T(T, t)$
	Anzahl adressierter Konzepte	$\mathbf{REL}_{\text{real}}^T(T, t)$
Konzept	Anzahl adressierter Use Cases	$\mathbf{REL}^K(K, t)$
	Summierte Relevanz adressierter Use Cases	$\mathbf{REL}_{\text{kum}}^K(K, t)$
	Anzahl adressierter Szenarien	$\mathbf{REL}_{\text{norm}}^K(K, t)$

In Tabelle 5.4 sind die Bewertungsgrößen über die verschiedenen Ebenen des TFG zusammengefasst. Zudem sind die Fragestellungen, die in den unterschiedlichen Ebenen des TFG durch die Relevanzbewertung verfolgt werden, dargestellt. Ziel der Informationsbewertungsphase ist es, die Wirtschaftlichkeits- und Realisierbarkeitsbewertungen mit den Relevanzbewertungen zu kombinieren und hieraus den entstehenden Handlungsbedarf für das Technologiefeld abzuleiten und entsprechend die Technologieentwicklungsprojekte zu priorisieren. In der Priorisierung ist jedoch auch die *Abhängigkeit* der Knotenelemente, also der Grad der Beeinflussung durch andere Elemente, zu bestimmen.

#### 5.4.4 Abhängigkeit

Durch das Bewertungskriterium der Relevanz wird auf Grundlage der Knotenausgangsgrade des TFG die Relevanz der Knotenelemente ermittelt. Dieser aktiven Beeinflussung steht eine *Abhängigkeit*  $Dep$  (aus dem Englischen: Dependency) von anderen Knotenelementen gegenüber. Das Relationsmodell (vgl. Abschnitt 5.3.2) legt fest, welche Art der Beeinflussung durch die Ebenen des TFG ausgeübt werden kann. Die Stärke dieser Abhängigkeit wird auf Grundlage des Knoteneingangsgrads  $d_G^-(v)$  (vgl. Abschnitt 4.2.1) quantifiziert.

Im Gegensatz zur Relevanz wird die Abhängigkeit nicht als zeitabhängige Bewertungsgröße betrachtet. Eine Aussage über den zeitlichen Verlauf der Abhängigkeit ist auf Grundlage der vorliegenden Daten nicht sinnvoll. Durch die Bestimmung der Relevanz ist für jedes Knotenelement festgelegt, in welchem Zeitbereich das Element für das Technologiefeld von Bedeutung ist. Ab dem Zeitpunkt der ersten Relevanz ist auch eine Abhängigkeit von adjazenten Knoten gegeben, deren inzidente Kanten auf den Knoten gerichtet sind. Die Abhängigkeit wird somit als statische Kenngröße gesehen. Ihre Berücksichtigung erfolgt im Rahmen der Priorisierung (vgl. Abschnitt 5.4.5). Im folgenden Abschnitt wird das Vorgehen der Bewertung für die unterschiedlichen Ebenen mathematisch beschrieben und erläutert.

**Szenario** Die Ebene der Szenarien weist zum einen eine Abhängigkeit zur Ebene der Konzepte und zum anderen zur Ebene der Use Cases auf. Entsprechend lassen sich für jedes Szenario die Abhängigkeiten von den Use Cases berechnen, indem die Anzahl adjazenter Use Cases aufsummiert wird. Gleichung 5.29 beschreibt die Bildung des entsprechenden  $n_S$ -Vektor, der die Abhängigkeit den Szenarien zuordnet.

$$Dep_U^S(S_i) = \sum_{j=1}^{n_U} \{U_j, S_i\} \in E \quad (5.29)$$

Auf selbige Weise wird die Abhängigkeit von der Konzeptebene bestimmt, die Addition adjazenter Konzepte bestimmt den  $n_S$ -Vektor nach dem Schema:

$$Dep_K^S(S_i) = \sum_{o=1}^{n_K} \{K_o, S_i\} \in E. \quad (5.30)$$

Mit der Abhängigkeit der Szenarien kann eine Indikation darüber gegeben werden, welchen Aufwand die Umsetzung des Szenarios mit sich ziehen kann. Hierbei ist die individuelle Kom-

plexität der Use Cases jedoch nicht berücksichtigt. Außerdem kann über die Abhängigkeit zur Konzeptebene eine Aussage darüber getroffen werden, ob die Szenarien bereits durch ein Konzept adressiert werden und mit einer praktischen Umsetzung zu rechnen ist.

**Use Case** Die Abhängigkeitsbewertung in der Ebene der Use Cases erfolgt in einem identischen Vorgehen zur Szenarioebene. Über den  $n_U$ -Vektor  $Dep_F^U(U)$  wird die Abhängigkeit für jeden Use Case von der Funktionsebene bestimmt.

$$Dep_F^U(U_j) = \sum_{l=1}^{n_F} \{F_l, U_j\} \in E \quad (5.31)$$

Die Berechnung folgt Gleichung 5.29 und beschreibt die Anzahl der benötigten Funktionen zur Realisierung des Use Cases. Auf Grundlage dieser Kenngröße kann eine frühzeitige Abschätzung über die Umsetzung des Use Case erfolgen. Besitzt ein Use Case besonders viele adjazente Funktionen, ist seine Realisierung als aufwendig zu bewerten. Unberücksichtigt bleibt an dieser Stelle wieder die individuelle Komplexität der Funktionen, da eine Komplexitätsabschätzung im Rahmen der strategischen Technologieplanung aufgrund der frühen Phase nicht sichergestellt werden kann (vgl. Abschnitt 3.3.2).

Für eine Abschätzung der Umsetzbarkeit eines Use Case durch ein reales Konzept oder Produkt wird die Abhängigkeit zwischen der Use Case- und Konzeptebene durch den  $n_U$ -Tupel nach folgendem Schema beschrieben:

$$Dep_K^U(U_j) = \sum_{m=1}^{n_T} \{K_o, U_j\} \in E. \quad (5.32)$$

**Funktion** Für die Ebene der Funktionen lässt sich lediglich die Abhängigkeit von adjazenten Technologien bestimmen. Somit kann abgeschätzt werden, wie viele Technologien zur Realisierung des Use Cases potenziell zur Verfügung stehen. Diese Untersuchung kann die Berechnung der technologischen und monetären Realisierbarkeit unterstützen. Ist eine Vielzahl von Technologien in der Lage die Funktion zu realisieren, so ist eine tatsächliche Realisierbarkeit wahrscheinlich. Gleichung 5.33 beschreibt die Bildung des entsprechenden  $n_F$ -Vektors.

$$Dep_F^F(F_l) = \sum_{m=1}^{n_F} \{T_m, F_l\} \in E \quad (5.33)$$

**Technologie** Für die Ebene der Technologien lässt sich keine Berechnung von Abhängigkeiten durchführen, da aufgrund des Relationsmodells (vgl. Abbildung 5.11) die Technologieknoten lediglich als Quelle fungieren und keine Kanten auf einen Technologieknoten gerichtet sind. Entsprechend ist keine Berechnung des Knoteneingangsgrades möglich. Die Technologien werden als unabhängige Einflussgröße für das Technologiefeld gesehen, die nur durch eine Technologieentwicklung beeinflusst werden kann.

**Konzept** Auf der Konzeptebene kann durch das Relationsmodell die Abhängigkeit von der Technologieebene bestimmt werden. Somit wird eine Abschätzung für die Komplexität der Umsetzung eines Konzepts ermöglicht. Durch die Verwendung vieler Technologien ist tendenziell mit einer erhöhten Funktionskomplexität in der Realisierung des Konzepts bzw. Produkts zu rechnen und auch eine erhöhte Produktkomplexität zu erwarten [154]. Hierbei ist die Komplexität von der Art der Anwendung abhängig. Die Berechnung der Abhängigkeit für die Konzeptebene wird dargestellt mit:

$$Dep^K(K_o) = \sum_{m=1}^{n_T} \{T_m, K_o\} \in E. \quad (5.34)$$

Die Bestimmung der Relevanz und Abhängigkeit ist in Abbildung 5.17 in einen beispielhaften TFG für einen spezifischen Zeitpunkt  $t_k \in t$  dargestellt. Ausgehend von der Ebene der Szenarien werden Use Cases, Funktionen, Technologien und Konzepte in ihrer Relevanz und Abhängigkeit gewichtet. Durch die Steckbriefe der Szenarien (vgl. Abschnitt 5.2.1) ist für das Szenario  $S_1$  eine geringe Relevanz (1) und für Szenario  $S_2$  eine mittlere Relevanz (2) definiert. Diese Bewertung resultiert aus der Unternehmens- oder Technologiestrategie und sorgt für eine Ausrichtung des Technologiefelds an diesen Strategien. Somit wird die Unternehmensausrichtung über die Bewertung der Szenariosteckbriefe direkt im Methodenansatz berücksichtigt.

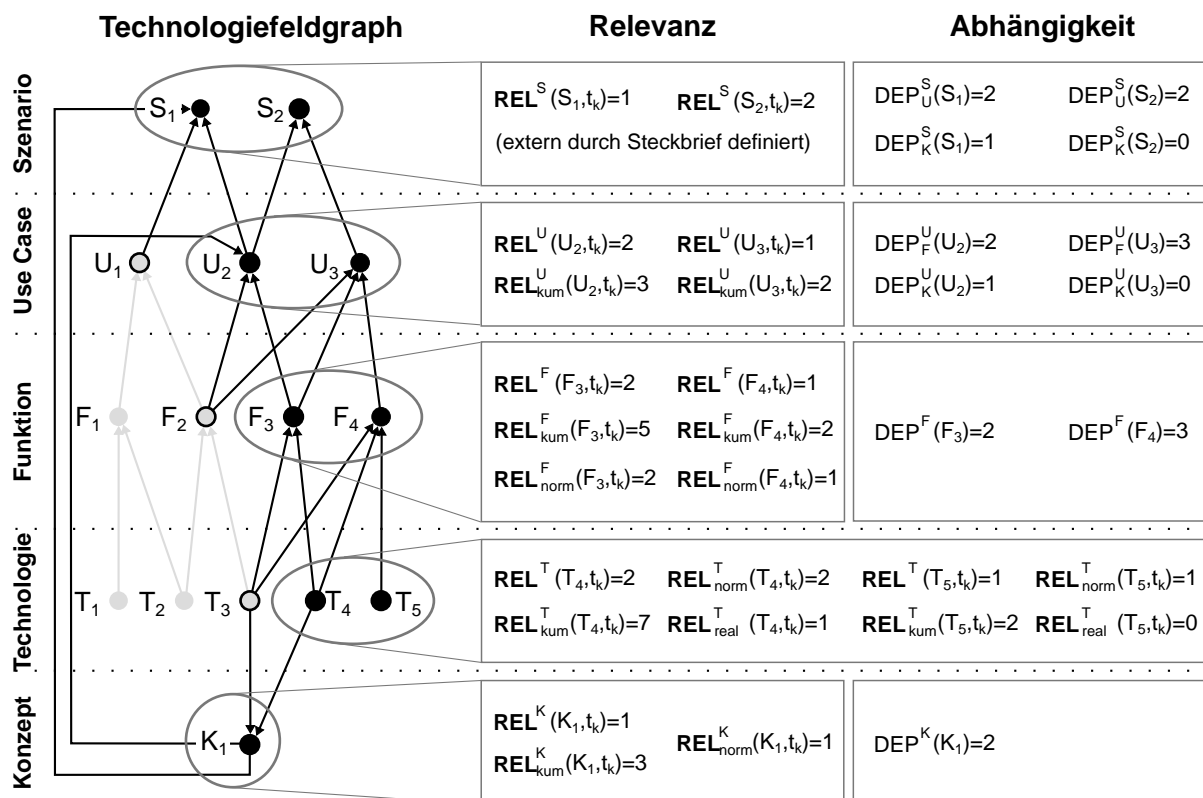


Abbildung 5.17: Aufbau der Relevanz- und Abhängigkeitsbewertung

Die Abhängigkeit der Szenarien unterscheidet sich in der konzeptorientierten Abhängigkeit, da ausschließlich für Szenario  $S_1$  ein adjazentes Konzept vorhanden ist. Die Relevanz der Use Cases  $U_2$  und  $U_3$  unterscheidet sich entsprechend der adjazenten Szenarien und den Relevanzen der Szenarien. Es ist erkennbar, dass dem Use Case  $U_2$  eine höhere Bedeutung zugeschrieben

werden kann, da sowohl die einfache als auch kumulierte Relevanz höhere Werte aufweist. In ihrer Abhängigkeit unterscheiden sich die Use Cases ebenfalls, Use Case  $U_3$  besitzt eine höhere Abhängigkeit und kein adjazentes Konzept.

In der Ebene der Funktionen ist ein Unterschied zwischen Funktion  $F_3$  und  $F_4$  zu erkennen. Funktion  $F_3$  weist für einfache, kumulierte und normalisierte Relevanz höhere Werte auf und kann als besonders relevant betrachtet werden. In der Abhängigkeit unterscheiden sich die Funktionen ebenfalls, Funktion  $F_3$  besitzt eine geringere Abhängigkeit, da lediglich zwei adjazente Technologien existieren. Die Relevanz für Technologie  $T_4$  ergibt sich aus den adjazenten Funktionen  $F_3$  und  $F_4$  sowie aus Konzept  $K_1$ . Technologie  $T_5$  besitzt aufgrund der geringen Anzahl adjazenter Funktionen entsprechend geringere Relevanzen, somit ist Technologie  $T_5$  eine geringere Bedeutung für das Technologiefeld zuzuordnen. Die Relevanz von Konzept  $K_3$  ist auf das adressierte Szenario  $S_1$  und den Use Case  $U_2$  zurückzuführen, die Abhängigkeit resultiert aus den adjazenten Technologien  $T_4$  und  $T_5$ .

Durch das angeführte Beispiel soll ein Einblick in die Vorgehensweise der Relevanz- und Abhängigkeitsbewertung gegeben werden. An diesem einfachen Beispiel ließe sich die Bewertung auch manuell durch Betrachtung der Graphendarstellung durchführen. Für komplexere Technologiefeldgraphen entfällt diese Möglichkeit und es muss auf die Bewertung durch die entsprechenden Kenngrößen zurückgegriffen werden. Zudem wird im aktuellen Beispiel lediglich ein Zeitpunkt betrachtet. Für eine vollständige Analyse ist die Bewertung für jeden Zeitschritt von  $t_1, \dots, t_n \in t$  durchzuführen. An die Bestimmung der Abhängigkeiten schließt sich die Definition von Maßnahmen im Sinne der strategischen Technologieplanung an. Aus diesem Grund gilt es aus den bisherigen Bewertungen den Handlungsbedarf abzuleiten und diesen zu priorisieren.

#### 5.4.5 Handlungsbedarf und Priorisierung

Die in den vorherigen Schritten abgeleiteten Kenngrößen stellen die Grundlage für die Ableitung von *Handlungsbedarf* und die entsprechende *Priorisierung* von Technologie- und Entwicklungsprojekten dar. In Anhang A.16 ist eine Zusammenfassung der Bewertungsgrößen für die Ebene des TFG dargestellt. Im nächsten Schritt des Methodenansatzes gilt es, durch den Abgleich der Knotenkenngrößen für den technologischen Reifegrad (vgl. Abschnitt 5.4.1), die Wirtschaftlichkeit (vgl. Abschnitt 5.4.2), die Relevanz (vgl. Abschnitt 5.4.3) und die Abhängigkeit (vgl. Abschnitt 5.4.4) die Handlungsempfehlungen für das Technologiefeld abzuleiten. Im Verlauf des Abschnitts werden zunächst das grundlegende Vorgehen und weiterhin die exemplarische Anwendung auf die Ebenen des TFG beschrieben.

**Handlungsbedarf** Die Handlungsempfehlungen für das Technologiefeld setzen sich aus einem Handlungsbedarf und einer Priorisierung der entsprechenden Maßnahmen zusammen. Durch den Handlungsbedarf **NFA** (aus dem Englischen: Need For Action) wird definiert, für welche Elemente des TFG die technologischen und monetären Anforderungen aufgrund der aktuell prognostizierten Entwicklungen nicht erreicht werden können. Durch die Matrizen **HK<sub>real</sub>** und **TRL<sub>real</sub>** bzw. **TRL<sub>theo</sub>** sind die monetären und technologischen Entwicklungen für die Knotenelemente definiert. Durch den Abgleich der Soll-Anforderungen mit den Ist-Zuständen können entsprechende Defizite identifiziert und ein Handlungsbedarf abgeleitet werden. Hierbei wird zwischen dem technologischen und dem monetären Handlungsbedarf unterschieden.

Ein technologischer Handlungsbedarf entsteht, wenn die gesetzten Anforderungen der Szenarien an den Technologiereifegrad durch die adjazenten Technologien bzw. Konzepte nicht erfüllt werden können. Hierbei wird zwischen dem theoretischen und dem realen Handlungsbedarf unterschieden. Ein theoretischer Handlungsbedarf kann für Knotenelemente bestimmt werden, die in keiner Relation zu einem Konzept stehen und für die keine technische Lösung existiert. Der theoretische Handlungsbedarf bestimmt sich durch den Abgleich von gefordertem mit theoretisch erreichbarem Reifegrad:

$$\mathbf{NFA}_{\text{tech|theo}} = \mathbf{TRL}_{\text{gef}} - \mathbf{TRL}_{\text{theo}}. \quad (5.35)$$

Unterschreitet der theoretisch erreichbare Reifegrad den geforderten Reifegrad, entsteht ein Handlungsbedarf, den es zu adressieren gilt. Analog ergibt sich der reale Handlungsbedarf durch den Abgleich von gefordertem Reifegrad durch die Szenarien mit dem konzeptseitig erreichbaren Reifegrad:

$$\mathbf{NFA}_{\text{tech|real}} = \mathbf{TRL}_{\text{gef}} - \mathbf{TRL}_{\text{real}}. \quad (5.36)$$

Die Bestimmung von monetärem Handlungsbedarf erfolgt durch einen Abgleich der Kostenziele der Szenarien mit den technologieseitig realisierbaren Aufwendungen für eine Umsetzung. Jedoch wird die Berechnungslogik umgekehrt. Übersteigen die realen Kosten die geforderten Kosten, entsteht ein monetärer Handlungsbedarf.

$$\mathbf{NFA}_{\text{mon|real}} = \mathbf{HK}_{\text{real}} - \mathbf{HK}_{\text{gef}} \quad (5.37)$$

**Priorisierung** Die Priorisierung ergänzt die Bestimmung des Handlungsbedarfs. Hierbei erfolgt eine semi-quantitative Bewertung durch den Vergleich der Knotenelemente einer Ebene. Eine Absolutbewertung unter Berücksichtigung aller Knotenelemente des TFG ist nicht zielführend, da unterschiedliche Relationsarten (vgl. Abschnitt 5.3.2) betrachtet werden. Als Ergebnis werden die Knotenelemente jeder Ebene des TFG auf einer Ordinalskala in ihrer Bedeutung gewichtet. Für die Kategorisierung müssen Grenzwerte bestimmt werden, um die quantitative Bewertung von Relevanz und Abhängigkeit in die Bewertungskategorien überführen zu können. Im Rahmen dieses Methodenansatzes wird für die Priorisierung der Mittelwert der kumulierten Relevanzen und Abhängigkeit als Grenzwert herangezogen. Dieser wird für jede Ebene des TFG individuell bestimmt. Der Mittelwert der Relevanz  $\overline{\mathbf{REL}}(t_k)$  ergibt sich zu:

$$\overline{\mathbf{REL}}(t_k) = \frac{\sum_{j=1}^{n_V} \mathbf{REL}(V_j, t_k)}{n} \forall t. \quad (5.38)$$

Die Mittelwertbestimmung der Abhängigkeit  $\overline{\mathbf{Dep}}$  erfolgt identisch zu:

$$\overline{\mathbf{Dep}} = \frac{\sum_{j=1}^{n_V} \mathbf{Dep}(V_j)}{n}. \quad (5.39)$$

Auf Grundlage dieser Grenzwerte erfolgt eine Kategorisierung in vier Arten von Knotenelementen. Diese Kategorisierung ist in Tabelle 5.5 dargestellt. Es wird zwischen den Kategorien der *dominanten*, *abhängigen*, *kritischen* und *isolierten Knotenelemente* unterschieden. Diese Kategorisierung ist angelehnt an die Wechselwirkungsanalyse [157].



Als dominante Knotenelemente gelten solche, die einen starken Einfluss auf andere Elemente besitzen und nur in geringem Maße von anderen Elementen beeinflusst werden. Somit besitzen diese Elemente eine hohe Relevanz und eine geringe Abhängigkeit. Dies entspricht dem graphentheoretischen Konzept der Authorities (vgl. Abschnitt 4.2.1). Dominante Knoten werden hoch priorisiert und entsprechend durch einen numerischen Wert von 3 ausgedrückt. Im Gegensatz hierzu sind die abhängigen Knotenelemente durch eine geringe Relevanz und erhöhte Abhängigkeit charakterisiert. Diese Knotentypen können auch als Hub bezeichnet werden und sind durch einen numerischen Wert von 2 mit einer mittleren Priorität gewichtet.

**Tabelle 5.5:** Logik der Priorisierung

Relevanz	Abhängigkeit	Bezeichnung	math. Beschreibung	Priorisierung
hoch	hoch	kritischer Knoten	$\text{REL} \geq \overline{\text{REL}} \cap \text{Dep} \geq \overline{\text{Dep}}$	sehr hoch (4)
hoch	gering	dominanter Knoten	$\text{REL} \geq \overline{\text{REL}} \cap \text{Dep} < \overline{\text{Dep}}$	hoch (3)
gering	hoch	abhängiger Knoten	$\text{REL} < \overline{\text{REL}} \cap \text{Dep} \geq \overline{\text{Dep}}$	mittel (2)
gering	gering	isolierter Knoten	$\text{REL} < \overline{\text{REL}} \cap \text{Dep} < \overline{\text{Dep}}$	gering (1)

Ist ein Knoten sowohl durch eine hohe Relevanz als auch eine starke Abhängigkeit geprägt, wird das Knotenelement als kritisch bezeichnet, da sowohl die Umsetzung von vielen anderen Elementen beeinflusst wird als auch eine Vielzahl von anderen Elementen von der Umsetzung bzw. Entwicklung des Knotenelements abhängig ist. Ein kritischer Knoten wird folglich sehr hoch priorisiert und durch einen Wert von 4 ausgedrückt. Das Gegenteil hierzu stellen die isolierten Knotenelemente dar. Isolierte Knotenelemente sind sowohl durch eine geringe Relevanz als auch eine geringe Abhängigkeit von anderen Elementen charakterisiert. Folglich ergibt sich eine geringe Priorisierung, diese wird durch einen numerischen Wert von 1 gekennzeichnet.

Eine besondere Bedeutung in der Priorisierung kommt den Funktionen zu, für die gilt  $\text{Dep}^F(F_I) = 0$ , für die also keine Technologie zur Realisierung zur Verfügung steht (vgl. Abschnitt 5.4.4). An dieser Stelle ist auf einen *technologischen Whitespot* zu schließen. Für das Technologiefeld kann dieser Whitespot von großer Bedeutung sein, da eine Realisierung der entsprechenden Funktion Grundvoraussetzung für die Bearbeitung des Technologiefelds ist. Entsprechende Maßnahmen sind eine erneute Technologierecherche oder die interne bzw. externe Technologiebeschaffung. Ebenfalls lässt sich auf diese Weise die Identifikation von sogenannten *Schlüsseltechnologien*, also Technologien, die eine besondere Bedeutung für das Technologiefeld besitzen, umsetzen. Weist ein Funktionsknoten des TFG einen Knotengrad von  $\text{Dep}^F(F_I) = 1$  auf, bedeutet dies, dass lediglich eine Technologie des Graphen für die Umsetzung der Funktion bekannt ist. Somit sind für die Sicherstellung des Funktionsrealisierung die Weiterentwicklung bzw. bei einer unternehmensexternen Technologie die langfristige Sicherung der Technologiekompetenz von besonderer Bedeutung. Auch die Entwicklung von alternativen Technologien zur Realisierung dieser Funktion ist eine Möglichkeit, um die Abhängigkeit von dieser Schlüsseltechnologie zu reduzieren [155].

Für eine tiefgreifende Erläuterung der Bestimmung von Handlungsbedarf und Priorisierung wird an dieser Stelle auf den Anhang verwiesen. In Anhang A.15 ist das Vorgehen eingehend beschrieben und Anhand der Ebenen des Technologiefeldgraphen detailliert dargestellt. Um ein besseres Verständnis für die Bestimmung der Priorisierung zu schaffen, ist in Abbildung 5.18 eine

exemplarische Bewertung dargestellt. Das Beispiel baut auf den Relevanzen und Abhängigkeiten aus dem in Abschnitt 5.4.5 beschriebenen Beispiel auf und überführt die bestimmten Werte in eine Priorisierung. Zu berücksichtigen ist, dass hier lediglich die Bewertung für einen definierten Zeitpunkt  $t_k \in t$  beschrieben ist.

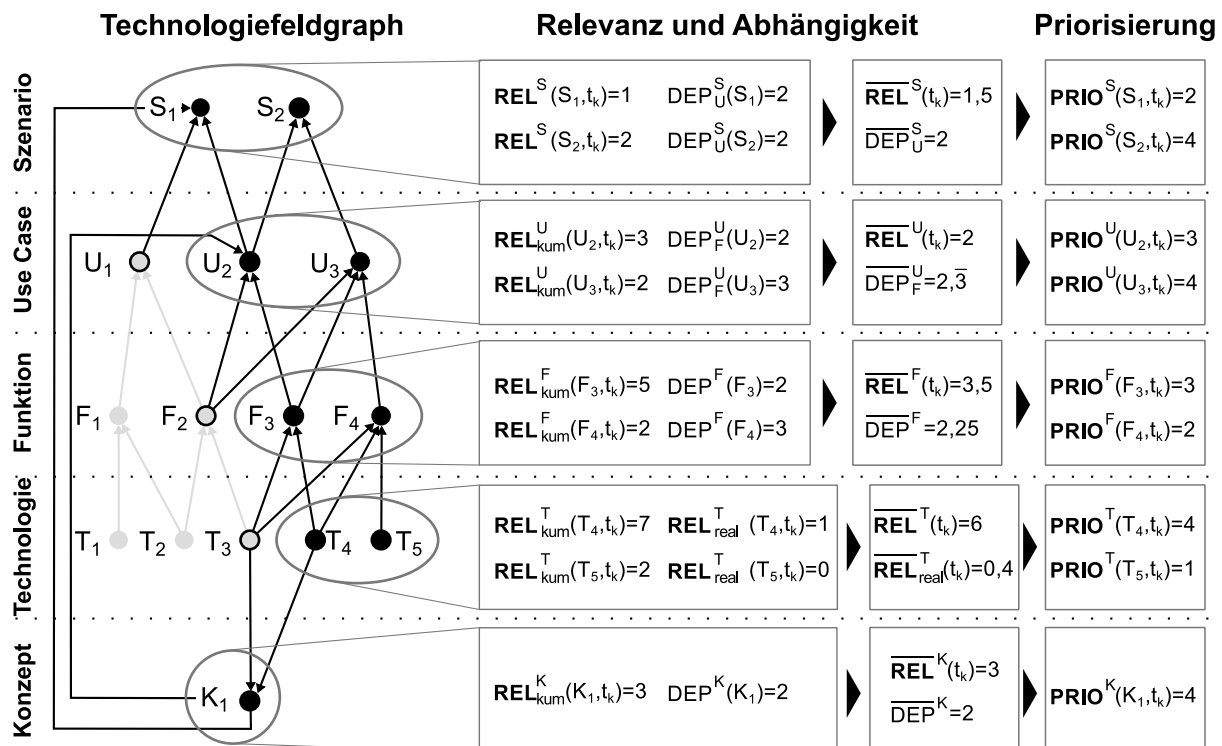


Abbildung 5.18: Vorgehen zur Priorisierung

In Abbildung 5.18 werden nur ausgewählte Elemente des TFG betrachtet, um die Übersichtlichkeit der Darstellung zu gewährleisten. Im Zuge der Mittelwertbestimmung für Relevanz und Abhängigkeit werden auch die Knotenelemente berücksichtigt, die nicht Umfang der Detailbetrachtung sind. Szenario  $S_1$  und Szenario  $S_2$  weisen identische Abhängigkeiten auf, unterscheiden sich jedoch in ihrer Relevanz. Entsprechend resultiert hieraus eine höhere Priorisierung von Szenario  $S_2$ . Durch den Vergleich der Use Cases  $U_2$  und  $U_3$  ergibt sich für die Use Cases eine hohe und sehr hohe Priorisierung. Insbesondere Use Case  $U_3$  ist als kritisches Knotenelement zu betrachten, da eine inzidente Kante zum hoch priorisierten Szenario  $S_2$  existiert und gleichzeitig eine hohe Abhängigkeit von der Funktionsebene vorherrscht. In der Funktionsebene unterscheiden sich  $F_3$  und  $F_4$  sowohl in ihrer Abhängigkeit als auch in ihrer Relevanz. Während Funktion  $F_3$  eine vergleichsweise hohe Relevanz aufweist, ist Funktion  $F_4$  durch eine hohe Abhängigkeit geprägt. Entsprechend der Priorisierungslogik resultiert aus diesen Bewertungen eine hohe Priorisierung für  $F_3$  und eine mittlere Priorität für Funktion  $F_4$ . Für die weiteren Entwicklungstätigkeiten bedeutet dies, dass Funktion  $F_3$  eine höhere Bedeutung zuzumessen ist und u. U. eine unternehmensinterne Technologieentwicklung oder externe Beschaffung zur Realisierung dieser Funktion notwendig ist, sollte ein Handlungsbedarf für die Funktion bestehen. Für die Ebene der Technologien ist ein deutlicher Unterschied in der Relevanz und Abhängigkeit zu erkennen. Während sich für Technologie  $T_4$  überdurchschnittliche Werte für Relevanz und Abhängigkeit und eine sehr hohe Priorität ergeben, ist für Technologie  $T_5$  nur eine adjazente Funktion im TFG definiert.

Entsprechend resultiert eine geringe Priorität. Auf der Ebene der Konzepte ist lediglich ein Konzept  $K_1$  definiert, entsprechend besitzt dieses Konzept auch die höchste Priorität.

Neben der Bestimmung der Prioritäten ist die Ableitung des entsprechenden Handlungsbedarfs das Kernziel der Informationsbewertungsphase. Um auch für diesen Methodenschritt ein besseres Verständnis zu schaffen, ist in Abbildung 5.19 das Vorgehen zur Bestimmung des Handlungsbedarfs dargestellt. Die Darstellung basiert ebenfalls auf dem Beispiel aus Abschnitt 5.4.5 und zeigt einen einfachen Graphen mit geringer Dichte. Zur besseren Übersichtlichkeit ist ausschließlich die Bestimmung des technologischen Handlungsbedarfs für ausgewählte Elemente des TFG dargestellt. Die Bestimmung des monetären Handlungsbedarfs erfolgt analog, weist im Gegensatz zur Reifegradbetrachtung aber einen sinkenden Kostenverlauf auf.

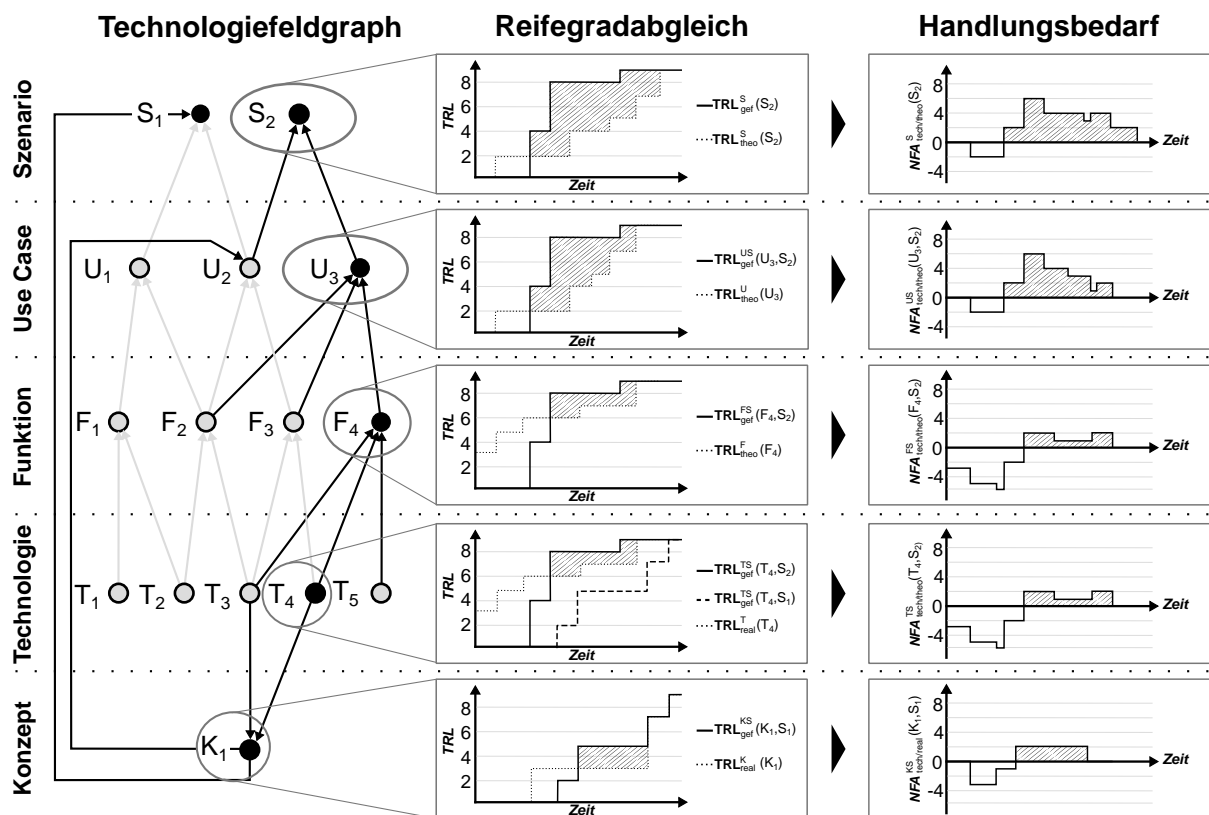


Abbildung 5.19: Vorgehen zur Bestimmung des Handlungsbedarfs

Da in dem in Abbildung 5.19 dargestellten TFG für Szenario  $S_2$  kein adjacentes Konzept definiert ist, lässt sich lediglich der theoretische Handlungsbedarf  $NFA_{tech|theo}^S$  bestimmen. Durch Gleichung A.8 erfolgt der Reifegradabgleich auf der Szenarioebene, der erreichbare Reifegrad für Szenario  $S_2$  wird durch die Use Cases  $U_2$  und  $U_3$  festgelegt. Erkennbar ist, dass die Anforderungen zunächst nicht erfüllt werden können und der Handlungsbedarf entsprechend ansteigt, zum Ende des betrachteten Zeitfensters jedoch wieder abfällt. Die Betrachtung von Use Case  $U_3$  ergibt sich aus den Anforderungen von Szenario  $S_2$  und dem minimalen Reifegrad der adjacenten Funktionen  $F_2$ ,  $F_3$  und  $F_4$ , die den theoretischen Reifegrad definieren. Aus dem Abgleich von  $TRL_{gef}^{US}$  und  $TRL_{theo}^U$  entsprechend Gleichung A.14 ergibt sich der dargestellte Verlauf für den Handlungsbedarf. Dieser ähnelt dem Handlungsbedarf der Szenarioebene, steigt zunächst an und fällt zum Ende des betrachteten Zeitfensters wieder ab.

Für die Funktionsebene ist erkennbar, dass für Funktion  $F_4$  die Anforderungen aus Use Case  $U_3$  bzw. Szenario  $S_2$  prägend sind. Diese werden zunächst übertroffen, zu einem späteren Zeitpunkt jedoch unterschritten. Entsprechend ergibt sich ein abfallender Handlungsbedarf über den Zeitverlauf. Auf der Technologieebene ist die Bewertung für Technologie  $T_4$  dargestellt. Da mit der Knotenkombination  $T_4 - F_3 - U_2 - S_1$  und  $T_4 - F_3 - U_3 - S_2$  Wege zu beiden Szenarien des TFG existieren, sind entsprechend die Anforderungen beider Szenarien für die Technologie relevant (vgl. Gleichung A.20). In der Darstellung sind entsprechend die geforderten Reifegrade von Szenario  $S_1$  und  $S_2$  aufgetragen. Erkennbar ist, dass die Anforderungen von Szenario  $S_1$  erfüllt werden, der Reifegrad jedoch in einem bestimmten Zeitintervall hinter den Anforderungen von Szenario  $S_2$  zurückbleibt. Entsprechend ergibt sich ein Handlungsbedarf für dieses Zeitintervall. Auf der Ebene der Konzepte ist der Reifegrad durch die Steckbriefe beschrieben und  $\mathbf{TRL}_{\text{real}}^K$  somit bekannt (vgl. Abschnitt 5.2.3). Der Abgleich mit dem adjazenten Szenario  $S_1$  entsprechend Gleichung A.25 ergibt den Handlungsbedarf. Es wird deutlich, dass für ein bestimmtes Zeitintervall eine Reifegraddifferenz von zwei Stufen besteht.

Entsprechend dem beschriebenen Vorgehen zur Priorisierung und Handlungsbedarfsbestimmung lassen sich für alle Knoten des TFG Kennwerte bestimmen. Um für das Technologiefeld Handlungsempfehlungen abzuleiten, müssen die Ebenen des TFG separat betrachtet und die Knotenelemente auf Grundlage von Handlungsbedarf und Priorisierung gewichtet werden. Somit können für die unterschiedlichen Ebenen der TFG die besonders relevanten Elemente identifiziert und diese im Sinne der strategischen Technologieplanung berücksichtigt werden. Ferner wird eine Fokussierung der Entwicklungsaktivitäten auf die wesentlichen Elemente des Technologiefelds ermöglicht und gleichzeitig die Auswirkungen eines Misserfolgs aufgezeigt. Da mit steigender Dichte des Graphen die Übersichtlichkeit der Bewertung sinkt, ist eine entsprechende Visualisierung zielführend, um die Ergebnisse in einer intuitiv interpretierbaren Form darzustellen. Hierzu stellt die Graphentheorie geeignete Ansätze zur Verfügung, die im Rahmen des nächsten Abschnitts erläutert werden.

#### 5.4.6 Graphenvisualisierung

Durch die Bewertungen von Realisierbarkeit, Wirtschaftlichkeit, Relevanz und Abhängigkeit kann der bestehende Handlungsbedarf identifiziert und priorisiert werden. Jedoch ist die Übersichtlichkeit der Matrixdarstellung und die Visualisierung durch zeitliche Verläufe stark von der Größe des TFG abhängig und benötigt zusätzlichen Interpretationsaufwand. Um die Ergebnisdarstellung und eine intuitive Bewertung des Technologiefelds zu erreichen, werden an dieser Stelle die Ansätze zur Visualisierung großer Netzwerke genutzt. Die Potenziale der Graphentheorie (vgl. Abschnitt 4.4) werden dafür genutzt, eine Entscheidungsgrundlage zur intuitiven Interpretation bereitzustellen. Die Priorisierung der Technologieprojekte durch Abbildung der komplexen Abhängigkeiten soll unterstützt und die Darstellung dynamischer Entwicklungsvorgänge ermöglicht werden. Ferner soll die Graphendarstellung als Vorbereitung für die Ableitung einer Technologieroadmap im letzten Schritt des Methodenansatzes dienen.

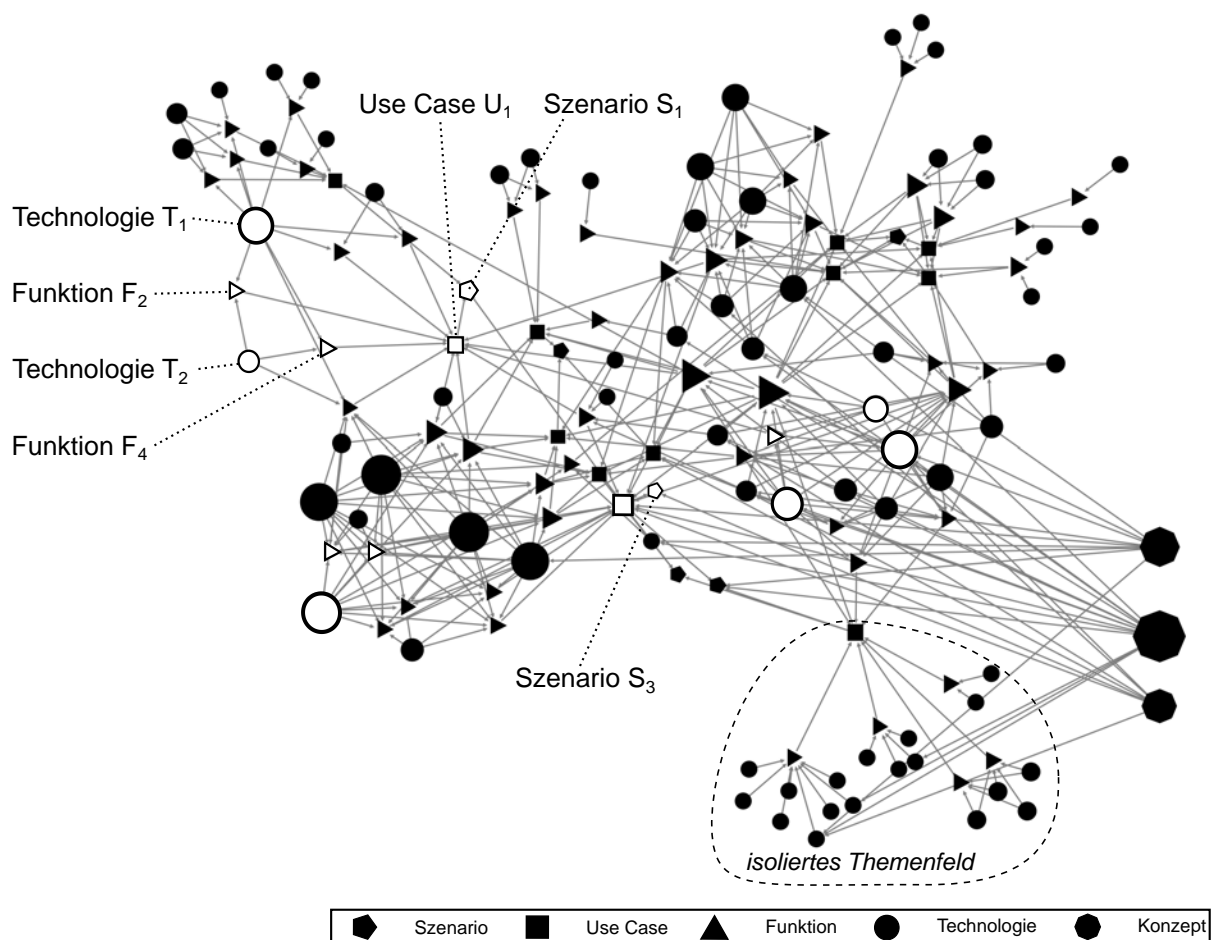
Für die Abbildung des TFG werden unterschiedliche Ansätze genutzt, um die klassische Form der Darstellung durch Punkte und Pfeile zu erweitern (vgl. Abschnitt 4.1) und so den Informationsgehalt des Graphen zu verdichten. Um die fünf Ebenen des TFG zu repräsentieren, werden die Knotenelemente durch geometrische Figuren dargestellt. Hierzu werden Kreise und Polygone

eingesetzt. Die Technologien werden durch einfache Kreise repräsentiert, wohingegen die Knotenelemente der Szenarien, Use Cases, Funktionen und Konzepte durch Polygone unterschiedlicher Art dargestellt werden. Somit kann eine Abbildung der hierarchischen Struktur des TFG erreicht und die Darstellung strukturiert werden.

Zur Darstellung der Priorisierung wird der Durchmesser des Knoten in Abhängigkeit der Priorität des Knotenelements variiert. Die Komponenten des TFG höherer Priorität werden hervorgehoben. In Bezug auf die Fragestellung kann auch die Relevanz oder Abhängigkeit der Knotenelemente durch den Durchmesser repräsentiert und so die Identifikation von Schlüsseltechnologien und technologischen Whitespots unterstützt werden. Ergänzend zur Darstellung wird der in Abschnitt 5.4.5 bestimmte maximale Handlungsbedarf durch die Knotenfärbung abgebildet. Hierbei kommt zur Unterstützung der Übersichtlichkeit eine binäre Darstellung zum Einsatz. Besteht ein technologischer oder monetärer Handlungsbedarf, werden die entsprechenden Elemente des TFG hervorgehoben, indem lediglich die Außenkonturen der Knotenelemente dargestellt werden. Auf die Abbildung des quantitativen Handlungsbedarfs wird an dieser Stelle verzichtet, da dieser als Attribut den Knotenelemente zugeordnet wird und für individuelle Bewertungen aus den Knotenattributen abgerufen werden kann. Eine Darstellung des quantitativen Handlungsbedarfs durch Farbverläufe für die Knotenelemente kann als Erweiterung genutzt werden.

Die Visualisierung der Abhängigkeiten innerhalb des TFG wird auf Grundlage der in Abschnitt 4.4 beschriebenen Verfahren zum kräftebasierten Layout von Graphen umgesetzt. Somit werden Bereiche des TFG, die eine hohe innere Vernetzung aufweisen, in einen räumlichen Kontext gebracht. Auf diese Weise erfolgt eine Gruppierung der Knotenelemente und es lassen sich entsprechende Communities identifizieren, die einen stark vernetzten Bereich der TFG umfassen. So werden beispielsweise Technologien, die große Ähnlichkeit in Bezug auf ihre Funktionsrealisierung haben, zusammengefasst. Diese *Technologiecluster* zeichnen sich durch eine hohe Abhängigkeit aus, bieten jedoch auch das Potenzial, Wechselwirkungen zwischen den Technologien nutzbar zu machen. Ferner lässt sich der TFG in mehrere Themenbereiche untergliedern und so eine Strukturierung des Technologiefelds vornehmen. Diese Strukturierung kann eingesetzt werden, um die strategische Technologieplanung bei der Definition von Technologieplänen (vgl. Abschnitt 3.3.2) zu unterstützen. [81, 157]

Die Abbildung der dynamischen Entwicklungsvorgänge innerhalb des TFG wird durch eine zeitliche Variation des Graphen erreicht. Hierzu werden die Kenngrößen des Graphen zu jedem Zeitpunkt  $t_k$  neu berechnet und die Visualisierung der Knotenkenngrößen für den maximalen Handlungsbedarf und die Priorisierung durch die zuvor genannten Möglichkeiten aktualisiert. Somit lässt sich ein zeitlicher Verlauf der Kenngrößen abbilden und beispielsweise ein Prioritätenwechsel über den Zeitverlauf durch neue Szenarioanforderungen beschreiben. Die Darstellung ist als eine sequentielle Abfolge von einzelnen TFG zu verstehen, in der sich Größe und Füllgrade der Knotenelemente unterscheiden können, die Position der Knoten jedoch konstant bleibt. Die Knotenposition wird durch die kräftebasierten Layoutverfahren definiert, die sich an den Kanten des TFG orientieren. Da die Kanten des TFG als statische Größe definiert sind, bleibt das Layout des Graphen über den Zeitverlauf konstant. Durch den Einsatz einer Visualisierungssoftware wie GEPHI besteht die Möglichkeit, den Knotenattributen und Variablen des Graphen einen Gültigkeitsbereich zuzuordnen und so einen dynamischen Technologiefeldgraphen zu erzeugen.



**Abbildung 5.20:** Visualisierung eines exemplarischen Technologiefeldgraphen

In Abbildung 5.20 ist die Visualisierung für einen Technologiefeldgraphen an einem Beispiel dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass lediglich ein Zeitausschnitt  $t_k \in t$  dargestellt ist. In der Darstellung ist zu erkennen, dass für Szenario  $S_1$  und Szenario  $S_3$  ein Handlungsbedarf besteht. Anhand von Szenario  $S_1$  soll die Darstellung weiter interpretiert werden.

Für die Umsetzung von Szenario  $S_1$  besteht ein Handlungsbedarf innerhalb des Use Case  $U_1$ , welcher wiederum auf einen Handlungsbedarf in den Funktionen  $F_2$  und  $F_4$  zurückzuführen ist. Für die Realisierung dieser beiden Funktionen stehen potenziell die Technologien  $T_1$  und  $T_2$  zur Verfügung. Durch die höhere Priorisierung von Technologie  $T_1$  gilt es diese in der Technologieentwicklung zu bevorzugen, da sie für eine höhere Anzahl von Funktionen zum Einsatz kommen kann. Weiterhin ist innerhalb des TFG ein isoliertes Themenfeld erkennbar, das sich auf einen spezifischen Use Case bezieht und deren adjazente Funktionen und Technologien keine Kanten zu anderen Elementen des TFG aufweisen. Somit kann dieses Themenfeld isoliert bearbeitet und die Technologien in der Entwicklung auf potenzielle Synergieeffekte überprüft werden. Der in Abbildung 5.20 dargestellte Graph soll an dieser Stelle lediglich zur Veranschaulichung dienen.

Die Ergebnisse der Informationsbewertungsphase für die strategische Technologieplanung werden zur Aufbereitung einer Graphendarstellung genutzt. Ziel des Methodenansatzes ist es jedoch auch, die Ergebnisse in Form einer Technologieroadmap zu repräsentieren und so die Ausrichtung des

Technologiefelds im Sinne des Technologiemanagements zu unterstützen. Den letzten Schritt der Informationsbewertungsphase bildet daher die Ableitung einer Technologieroadmap und die Darstellung der zeitlichen Staffelung der Entwicklungsprioritäten. Diese Informationen sind durch die dynamischen Kenngrößen von Relevanz, Abhängigkeit, Priorisierung und Handlungsbedarf für den TFG bestimmt. Mit der Roadmapdarstellung werden diese in eine zweidimensionale Darstellung überführt.

#### 5.4.7 Roadmapdefinition

Das Ziel einer Technologieroadmap ist es, die strategische Ausrichtung eines Themenbereichs durch die strukturierte Erarbeitung und Darstellung eines Ablaufplans ähnlich einer Straßenkarte zu unterstützen und eine gemeinsame Zielvorstellung für die beteiligten Stakeholder zu schaffen. Diese Darstellungsform soll im Rahmen des Methodenansatzes genutzt werden, um die Ergebnisse der Informationsbewertungsphase abzubilden und die räumliche Graphendarstellung der technologischen und monetären Abhängigkeiten um eine Darstellung der zeitlichen Abhängigkeiten zu ergänzen. Der Vorteil gegenüber einer Graphendarstellung liegt in der geringeren Komplexität und der bereits bestehenden Bekanntheit und Akzeptanz bei Entscheidungsträgern. Jedoch beschränkt sich die Technologieroadmap auf die Darstellung technologischer und zeitlicher Abhängigkeiten. Monetäre Abhängigkeiten werden nicht dargestellt. [1, 89, 125, 126]

Im Rahmen der Technologieroadmap werden Interdependenzen für die Ebenen Märkte, Produkte, Technologien und Ressourcen identifiziert und über den zeitlichen Verlauf dargestellt. Somit ist erkennbar, welche Abhängigkeitsverhältnisse zwischen Technologieentwicklungsprojekten und marktseitigen Bedürfnissen bestehen und weshalb spezifische Elemente zu priorisieren sind. Die klassische Methodik sieht einen mehrstufigen Workshopansatz vor, in dem sukzessive die Abhängigkeiten zwischen jeweils zwei Ebenen durch Relationsmatrizen nach dem Top-Down-Prinzip beschrieben werden (vgl. Abschnitt 3.4). In seinem Aufbau ähnelt der Technologiefeldgraph bereits den Ebenen einer Technologieroadmap und die Abhängigkeitsverhältnisse sind durch die Adjazenzmatrix  $A_{\text{ges}}$  bekannt.

Durch den Technologiefeldgraphen wird darüber hinaus auch die dynamische Entwicklung der Knotenelemente hinsichtlich des Technologiereifegrades und der Wirtschaftlichkeit dokumentiert. Somit können der TFG und die entsprechenden Bewertungsmatrizen (vgl. Anhang A.16) als Informationsgrundlage für eine Roadmapdarstellung genutzt werden. Die Ebene der Szenarien des TFG repräsentiert die exogenen Erwartungen der Stakeholder an das Technologiefeld und wird der Ebene des Marktes in einer Technologieroadmap gleichgesetzt, da diese Ebene die Kundenerwartungen repräsentiert. Um die Übersichtlichkeit bei einer großen Anzahl von Szenarien zu steigern, werden in der Roadmap lediglich die Szenarien dargestellt, für die sich durch den TFG ein aktiver Handlungsbedarf ergibt. Die Ebene der Produkte, die in einer Technologieroadmap physische Erzeugnisse und technische Systeme darstellen (vgl. Abschnitt 3.1.2), ist im Rahmen des TFG nicht explizit abgebildet. Implizit lässt sich die Ebene jedoch aus den Use Cases und Konzepten des TFG beschreiben. Hierbei sind Use Cases als zukünftig denkbare Produkte zu interpretieren, die sich in der Produktplanung befinden (vgl. Abschnitt 3.1.2), also noch nicht real existieren. Konzepte hingegen befinden sich bereits in der Produktentwicklung oder Produktnutzung. Der Reifegrad des Konzepts ist ausschlaggebend für die Positionierung

im Produktlebenszyklus. Entsprechend wird die Ebene der Produkte in der Darstellung in zwei Unterebenen für die Use Cases und Konzepte zergliedert.

Eine Verknüpfung zwischen Use Cases und Technologien innerhalb des TFG wird durch die Zwischenebene der Funktionen erreicht. Diese Ebene ist im Rahmen des klassischen Technologieroadmappings nicht vorgesehen. Aus diesem Grund wird auf eine Darstellung der Funktionsebene verzichtet. Die Ebene der Technologien ist sowohl im TFG als auch im Technologieroadmapping vorhanden und kann identisch übernommen werden. Um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten, werden ausschließlich die Technologien dargestellt, für die ein aktiver Handlungsbedarf besteht. Somit werden in der Roadmap die Erwartungen für die Technologieentwicklung abgebildet. Die Darstellung der Technologien wird im weiteren Verlauf des Abschnitts thematisiert.

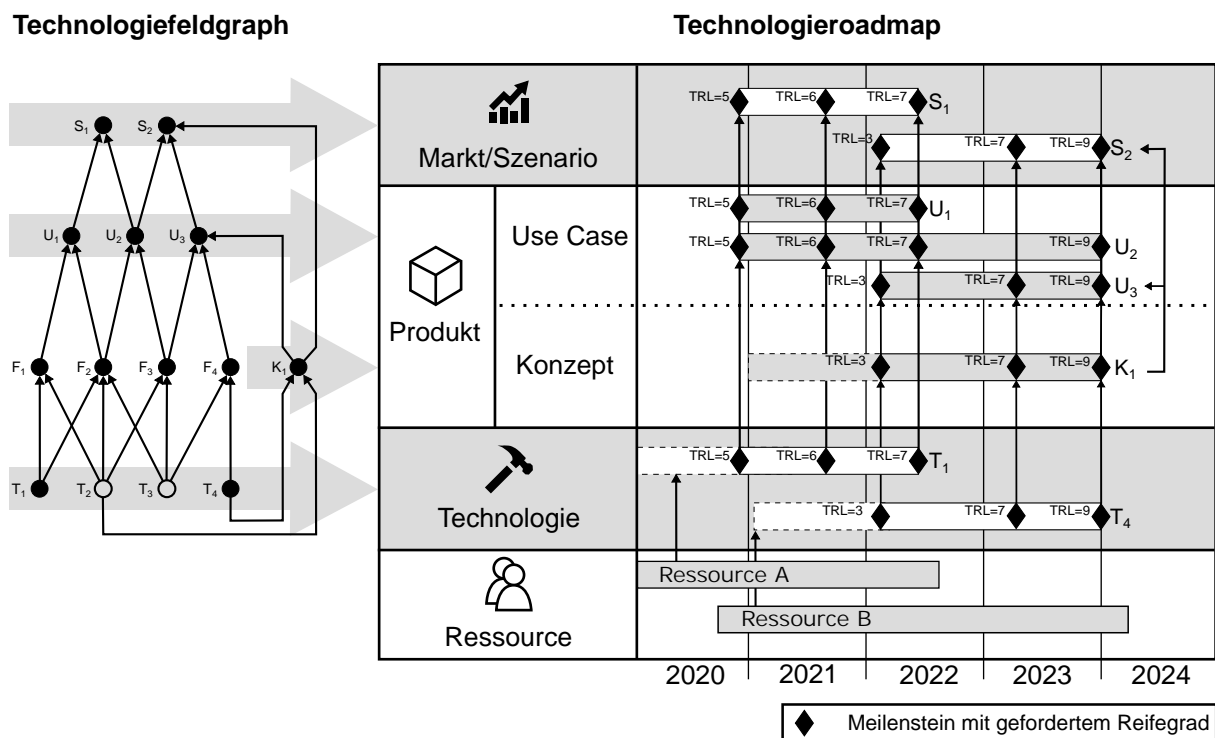
Die letzte Ebene einer Technologieroadmap bildet die Zuordnung von Ressourcen zu den Technologieprojekten und beinhaltet eine Aufwandsabschätzung für die Realisierung. Diese Ressourcenzuordnung ist nicht durch den TFG abgedeckt. Für die Erstellung einer Technologieroadmap ist es notwendig, diese Ebene zu ergänzen. Das Vorgehen ist analog zur Ressourcenallokation des klassischen Roadmappings (vgl. Abschnitt 3.4). Hierbei wird durch die Gegenüberstellung der unternehmensinternen Ressourcen mit den geforderten, zukünftigen Entwicklungen auf Technologieebene eine Planung erreicht.

Zur Überführung des Technologiefeldgraphen in eine Roadmapdarstellung sind Anpassungen und ergänzende Schritte notwendig. Durch den TFG ist der Zeitpunkt bekannt, zu dem eine Umsetzung von Szenarien, Use Cases und Konzepten gefordert wird. Entsprechend ist der geforderte Reifegrad für die Technologien bestimmbar. Somit können aus dem TFG Meilensteine für die Erreichung definierter Reifegrade für die Ebenen Markt, Produkt (aufgeteilt in Use Case und Konzept) und Technologie abgeleitet werden. Dass eine Technologieentwicklung mit zeitlichem Vorlauf erfolgen muss, um die geforderten Reifegrade in erster Instanz zu erreichen, wird durch die Definition von Meilensteinen jedoch nicht berücksichtigt. Somit muss auf Grundlage von Meilensteinen eine Rückwärtsterminierung für den Start der Technologieentwicklung stattfinden.

Weiterhin ist die Darstellung der Technologien einzuschränken, um die Übersichtlichkeit der Roadmapdarstellung zu gewährleisten. Im TFG sind sowohl Technologien enthalten, die in Konzepten zum Einsatz kommen und real in ein Szenario einfließen, als auch Technologien, die nur potenziell für eine Szenarioumsetzung geeignet sind. Das Ziel der Technologieroadmap ist es, die zukünftigen Entwicklungsaktivitäten abzubilden. Daher werden ausschließlich die Technologien dargestellt, die einen Handlungsbedarf (theoretisch oder real) aufweisen. Somit werden die Technologien dargestellt, die einen aktiven Einfluss auf die Entwicklung des Technologiefelds haben. Anhand von Abbildung 5.21 soll die Überführung eines TFG in eine Technologieroadmap verdeutlicht werden. Auf der linken Seite der Abbildung ist ein beispielhafter TFG dargestellt, der in eine entsprechende Roadmapdarstellung überführt wird.

Die Szenarien  $S_1$  und  $S_2$  des TFG werden auf die Marktebene der Technologieroadmap projiziert. Hierbei stellt jede Steigerung der Reifegradanforderung, definiert durch  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^S(S, t)$ , einen Meilenstein dar, den es zu erfüllen gilt. Bei der Definition der Produktebene wird zwischen Use Cases und Konzepten unterschieden, die als Produkte unterschiedlicher Lebenszyklusphasen verstanden werden können. Die Use Cases werden entsprechend ihrem gefordertem Reifegrad, definiert durch  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{US}}(U, S, t)$ , über den Zeitverlauf aufgetragen und die entsprechenden Relationen zu





**Abbildung 5.21:** Ableitung einer Technologieroadmap aus dem Technologiefeldgraphen

den Szenarien aufgetragen. Jede Reifegradanforderung der Szenarien lässt sich so auch in den adjazenten Use Cases wiederfinden. Analog erfolgt die Darstellung der Konzepte, indem aus der Matrix  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{KS}}(K, S, t)$  die geforderten Reifegrade der Konzepte abgelesen und aufgetragen werden. Verknüpfungen zwischen den Konzepten und Use Cases bzw. Szenarien, definiert durch die Adjazenzmatrix, werden ebenfalls aufgetragen. Entsprechend lassen sich für Konzept  $K_1$  die Reifegradanforderungen des adjazenten Szenarios  $S_2$  wiederfinden. Bei der Darstellung der Konzepte ist zu berücksichtigen, dass eine Rückwärtsterminierung des Projektstarts, ausgehend vom ersten Meilenstein, notwendig ist.

Die Darstellung der Technologien beschränkt sich, wie im Rahmen des Methodenansatzes beschrieben, auf Technologien mit einem Handlungsbedarf bzw. einer direkten Konzeptrelevanz. Dies trifft für die Technologien  $T_1$  und  $T_4$  zu. Da die Technologien  $T_2$  und  $T_3$  den Anforderungen der Szenarien entsprechen, wird auf eine Darstellung verzichtet und auch ihr Einfluss auf Konzepte und Use Cases nicht abgebildet. Die geforderten Reifegrade der Technologien  $T_1$  und  $T_4$  werden analog der Bewertungsmatrix  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{TS}}(T, S, t)$  in der Roadmap aufgetragen und die Wirkbeziehungen zu den Use Cases dargestellt. Den Abschluss bildet die Allokation von entsprechenden Ressourcen zu den Technologieprojekten. Dieser Planungsschritt erfolgt losgelöst von den vorherigen Schritten analog zum klassischen Vorgehen des Technologieroadmappings.

Als Ergebnis der Roadmaperstellung ist die zeitliche Dimension des Technologiefeldgraphen in eine zweidimensionale Darstellung überführt und es können die Verläufe der geforderten Reifegrade abgebildet werden. Somit ist erkennbar, weshalb Technologieentwicklungen notwendig sind und auf welche Szenarien und Use Cases diese zurückzuführen sind. Es ist zu berücksichtigen, dass lediglich die geforderten Reifegrade bzw. der bestehende Handlungsbedarf dargestellt sind. Eine zusätzliche Darstellung der realistischen Reifegrade ist jedoch grundsätzlich möglich, da die

entsprechenden Informationen durch die Matrizen der Bewertungsphase ebenfalls bekannt sind. Ferner kann so ein visueller Abgleich von geforderten und realistischen Entwicklungsverläufen erfolgen. Für komplexe Technologiefelder mit einer großen Anzahl von Knotenelementen kann zudem eine Einschränkung der dargestellten Elemente zielführend sein, um die Übersichtlichkeit der Technologieroadmap zu gewährleisten. So können beispielsweise nur die Use Cases und Szenarien dargestellt werden, die einen bestimmten Themenbereich adressieren. Die Bildung einer Technologieroadmap auf Grundlage des Technologiefeldgraphen bildet den Abschluss der Informationsbewertungsphase.

## 5.5 Erweiterbarkeit des Technologiefeldgraphen

Mit Abschluss der Informationsbewertungsphase liegen eine strukturierte Analyse des Technologiefelds und charakterisierende Kenngrößen vor. Die Ergebnisse sind in Form von Graphendarstellung und Roadmap für die Verwertung in der strategischen Technologieplanung dokumentiert. Die Ergebnisse müssen durch regelmäßige Aktualisierungen den äußeren Veränderungen angepasst werden, um einerseits die stetigen Entwicklungsprozesse auf Technologieseite zu berücksichtigen. Andererseits müssen neu entstehende Szenarien in den Technologiefeldgraphen integriert werden. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist ein erneutes Durchlaufen der drei Phasen des Methodenansatzes jederzeit möglich. Somit können die bereits enthaltenen Informationen der Knotenelemente aktualisiert und neue Elemente in den Technologiefeldgraphen integriert werden. So kann der TFG sukzessive um Informationen erweitert und für die Beantwortung spezifischer Fragestellungen, wie beispielsweise bei einem Vergleich zwischen zwei Technologiealternativen, angepasst werden.

Über die Aktualisierung und Erweiterung des TFG können zudem Technology-Push- und Market-Pull-Ansätze abgebildet und die Auswirkungen dieser Strategien untersucht werden. Bei der Verfolgung einer Technology-Push-Strategie sollen die Potenziale neuer Technologieentwicklungen dazu genutzt werden, Innovationen am Markt, losgelöst von einem bestehenden Bedarf (vgl. Abschnitt 3.3.1), zu realisieren. Durch die Integration von neuen Technologien und die Anpassung von Entwicklungsverläufen bestehender Technologien können die Auswirkungen auf die Priorisierung und die Veränderungen des Handlungsbedarfs (vgl. Abschnitt 5.4) abgeschätzt werden. Somit können Veränderungen auf der Technologieebene in den TFG projiziert werden und die entstehenden Potenziale auf die Ebenen der Szenarien und Use Cases abgeleitet werden. Ferner kann bewertet werden, ob sich der Realisierungszeitpunkt oder die Wirtschaftlichkeit von Szenarien durch technologische Veränderungen beeinflussen lassen und eine Verschiebung des Handlungsbedarfs stattfindet.

Diesem Vorgehen steht eine Market-Pull-Strategie gegenüber. Bei einer Markt-Pull-Strategie erfolgt eine bedarfsinduzierte Entwicklung von Innovationen. Für neue Szenarien und Use Cases gilt es, die benötigten Technologien bereitzustellen. Auch diese Strategie lässt sich durch eine Überarbeitung des TFG mit dem Methodenansatz abbilden. Durch das Hinzufügen von neuen Szenarien und Use Cases und ihrer Verknüpfung entsprechend dem Relationsmodell (vgl. Abschnitt 5.3.2) können die entstehenden Bedarfe auf der Technologieebene bewertet werden. So lassen sich zum einen technologische Whitespots identifizieren und zum anderen neue Handlungsbedarfe für bestehende Technologien ableiten. In frühen Phasen ist somit die

Bewertung der Realisierbarkeit von Szenarien, mit der zusätzlichen Option den Handlungsbedarf quantitativ durch die Anzahl der Technologiesprünge abzubilden, möglich.

Durch den Ansatz, die Phasen des Methodenansatzes mehrfach zu durchlaufen und die Inhalte des TFG zu erweitern, wird ebenfalls die Abfrage unterschiedlicher Informationsträger ermöglicht. So können beispielsweise durch Wiederholung der Informationsbeschaffungsphase (vgl. Abschnitt 5.2) unterschiedliche Zielgruppen über die Ebene der Szenarien und Use Cases abgefragt werden. Auf der anderen Seite kann durch die Befragung von unterschiedlichen Technologieexperten der Informationsgehalt dieser Ebene gesteigert werden. Die Erweiterung kann losgelöst von der Szenarioebene erfolgen, da eine Verknüpfung im Nachgang durch die Definition adjazenter Funktionen erfolgt.

Bei der Aktualisierung können unterschiedliche Strategien verfolgt werden. Eine ereignisgesteuerte Überarbeitung baut auf besonderen Meilensteinen auf, die entweder neue Inhalte für den TFG liefern oder die Rahmenbedingungen der Priorisierung verändern. Im Gegensatz hierzu werden in einer zyklusgesteuerten Überarbeitungsstrategie die Inhalte des TFG in regelmäßigen Abständen überarbeitet und die Ergebnisdarstellung entsprechend angepasst. Durch diese Verstetigung von Informationsbeschaffung, -verarbeitung und -bewertung kann eine Aktualität des TFG gewährleistet und den dynamischen Änderungsprozessen des Unternehmensumfeldes entgegengewirkt werden.

## 5.6 Zusammenfassung

Für die systematische Untersuchung von komplexen Technologiefeldern wie ASR, die durch eine hohe Entwicklungsdynamik geprägt sind, ist eine intuitive Priorisierung relevanter Technologieprojekte im Sinne der strategischen Technologieplanung nicht möglich. Im Rahmen dieses Kapitels ist ein Methodenansatz präsentiert worden, der auf Grundlage eines dreistufigen Verfahrens die strukturierte Analyse von Technologiefeldern ermöglicht, zeitliche, monetäre und technologische Abhängigkeiten identifiziert und Handlungsempfehlungen für die strategische Technologieplanung ableitet.

Der Methodenansatz umfasst eine Informationsbeschaffungsphase, die durch die Kombination von Workshopelementen mit einer Expertenbefragung relevante Informationen zusammenträgt. In einem mehrstufigen Ansatz werden die marktseitigen Anforderungen durch Szenarien und Use Cases beschrieben. Die Abstraktion von Funktionsbeschreibungen ermöglicht die Identifikation relevanter Technologien und Konzepte für das Technologiefeld und komplexe Abhängigkeiten werden systematisch sichtbar gemacht. Durch die Informationsverarbeitungsphase wird die geschaffene Informationsbasis auf der Grundlage eines einheitlichen Datenschemas und Relationsmodells in einen Technologiefeldgraphen überführt und strukturiert. Somit werden die Anwendung der graphentheoretischen Analyseansätze und die Abbildung von Reifegradentwicklungen, bedingt durch dynamische Entwicklungsprozesse, ermöglicht.

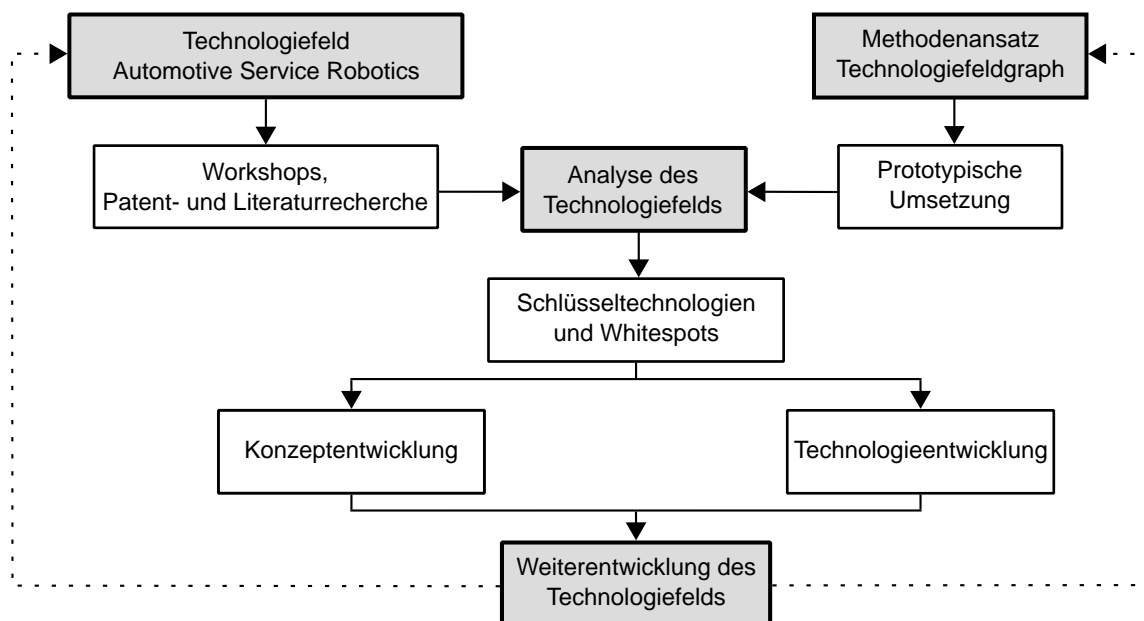
Die Repräsentation des Technologiefelds als Graph ermöglicht es, mit der Bestimmung der Eingangs- und Ausgangsgrade sowie technologischen und wirtschaftlichen Knotenattributen die Handlungsbedarfe aus dem Technologiefeld abzuleiten und Technologieprojekte entsprechend ihrer Bedeutung zu priorisieren. Die Ergebnisse können in Form eines Graphen dargestellt werden. Durch kräftebasierte Layoutverfahren wird die Clusterung von Technologieprojekten unterstützt.

Eine Roadmap bildet die zweite Form der Ergebnisdarstellung. In dieser können insbesondere die zeitlichen Abhängigkeiten der Technologieprojekte visualisiert werden. Durch einen zyklischen Aufbau des Methodenansatzes ist ein erneutes Durchlaufen und die kontinuierliche Erweiterung des Technologiefeldgraphen möglich. Ferner können die Auswirkungen von unterschiedlichen Technologiestrategien abgeschätzt werden. Im nächsten Schritt gilt es, den in diesem Abschnitt erarbeiteten Methodenansatz an einem praktischen Beispiel zu validieren.



## 6 Anwendung des Methodenansatzes für Automotive Service Robotics

Im Rahmen dieses Kapitels erfolgt die exemplarische Verwendung des in Kapitel 5 entwickelten Methodenansatzes auf das Technologiefeld Automotive Service Robotics, um die Anwendbarkeit und den hieraus entstehenden Mehrwert des Ansatzes zu untersuchen. Es wird zunächst das Vorgehen zur Validierung näher beschrieben, das Technologiefeld ASR unter Einbezug des Ansatzes untersucht und die Adressierung des identifizierten Handlungsbedarfs durch eine Technologie- und Konzeptentwicklung beschrieben. Auf Grundlage der Ergebnisse erfolgt im weiteren Verlauf der Arbeit eine Diskussion von Anwendbarkeit und Mehrwert des Methodenansatzes.



**Abbildung 6.1:** Vorgehen zur Validierung des Methodenansatzes

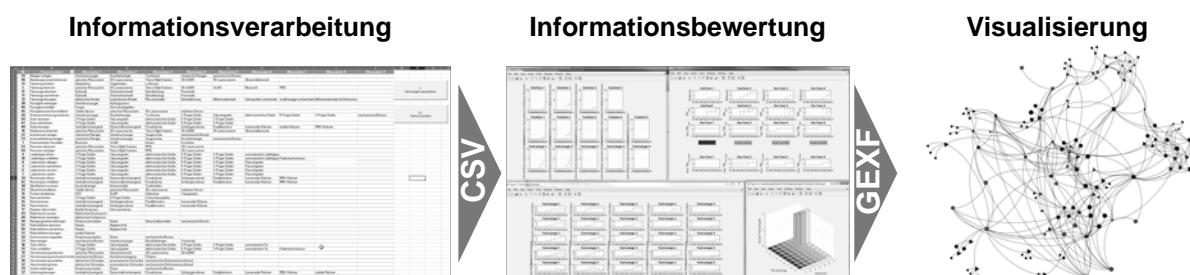
In Abbildung 6.1 ist das mehrstufige Vorgehen zur Validierung dargestellt. Ziel ist es, mithilfe des in Kapitel 5 beschriebenen Ansatzes das Technologiefeld ASR zu untersuchen. Hierzu werden an verschiedenen Beispielen technologische und konzeptionelle Handlungsbedarfe identifiziert und diese durch eine entsprechende Neuentwicklung von Konzepten und die Weiterentwicklung von Technologien bedient. Die Ergebnisse der Konzept- und Technologieentwicklung werden in den Technologiefeldgraphen zurückgeführt und die entstehenden Potenziale und Auswirkungen für das gesamte Technologiefeld aufgezeigt. Durch den geschlossenen Ablauf aus Methodenanwendung, Handlungsbedarfsbestimmung, Technologieentwicklung und Rückführung der Ergebnisse wird die Anwendbarkeit des Methodenansatzes validiert.

Zu Beginn wird in Abschnitt 6.1 der Methodenansatz in einer prototypische Softwaretoolkit umgesetzt, um Informationsbeschaffungsphase, -verarbeitungsphase und -bewertungsphase durch entsprechende Analyse- und Visualisierungsmöglichkeiten zu unterstützen. Für eine erste

Umsetzung werden hierzu bestehende Softwarebausteine miteinander kombiniert. Mit dem resultierenden Werkzeug wird anschließend das Technologiefeld ASR im Rahmen von Abschnitt 6.2 durch die Kombination von Workshops, Literatur- und Patentrecherche beschrieben, in einen Technologiefeldgraphen überführt und analysiert. Aus der Analyse werden beispielhaft mehrere Schlüsseltechnologien und technologische Whitespots aufgrund ihrer Handlungsbedarfe und Priorisierung herausgegriffen und detailliert betrachtet. Durch eine Konzept- und Technologieentwicklung werden die Reifegrade spezifischer Use Cases und Technologien gesteigert. Abschließend werden die Ergebnisse von Konzept- und Technologieentwicklung in den TFG zurückgeführt und der Mehrwert der entstandenen Ergebnisse für das Technologiefeld aufgezeigt.

## 6.1 Prototypische Umsetzung des Methodenansatzes

Insbesondere in der Phase der Informationsbewertung ist zur Analyse großer Datenmengen die Unterstützung durch geeignete Softwareanwendungen zielführend. Daher wird zunächst eine mögliche Umsetzung des Methodenansatzes in Form einer Toolchain (eine Kombination von Software-Anwendungen) vorgestellt. Ziel ist es, den Anwender bei der Analyse von Technologiefeldern durch eine intuitive Prozesskette zu unterstützen und die Bewertung zu systematisieren. Hierbei wird ein modularer Ansatz mit standardisierten Schnittstellen verfolgt, um eine Erweiterung und Anpassung der Toolchain zu ermöglichen.



**Abbildung 6.2:** Umsetzung des Methodenansatzes

In Abbildung 6.2 ist die im Rahmen der Arbeit verfolgte Umsetzung des Methodenansatzes aus Kapitel 5 dargestellt. Durch die Informationsbeschaffungsphase wird die Datengrundlage durch Kreativworkshops und Recherchen zusammengetragen (vgl. Abschnitt 5.2). Um diese Informationen für weitere Bewertungen vorzubereiten und in ein geeignetes Datenformat zu bringen, wird eine Visual Basic for Applications (VBA)-Anwendung verwendet. Die Informationsbewertungsphase, und somit die Analyse des Technologiefelds im Sinne der strategischen Technologieplanung, erfolgt im Rahmen dieser Arbeit durch die Berechnungssoftware MATLAB. Zur Darstellung und Interpretation der Ergebnisse wird die Visualisierungssoftware GEPHI verwendet.

Als Schnittstelle zwischen den Softwaremodulen der Informationsverarbeitung und -bewertung wird im Rahmen dieser Arbeit das CSV-Datenformat verwendet. Dieses Datenformat zeichnet sich durch eine hohe Kompatibilität und gute Erweiterbarkeit aus. Der Aufbau des CSV-Formats ist angelehnt an das Datenschema aus Abschnitt 5.3.1. Zwischen der MATLAB-Anwendung

und der Visualisierung durch GEPHI wird ebenfalls auf das Datenformat CSV als Schnittstelle zurückgegriffen. Um die dynamischen Entwicklungen innerhalb des Technologiefelds in einer graphenspezifischen Form abzubilden, wird zusätzlich das Graph Exchange XML Format (GEXF) verwendet [65]. Im weiteren Verlauf des Abschnitts werden die einzelnen Module genauer betrachtet und die Austauschformate beschrieben.

**Informationsverarbeitung** Als Ergebnis der Informationsbeschaffungsphase liegen die Informationen zur Beschreibung eines Technologiefelds in Form von Steckbriefen vor (vgl. Abschnitt 5.2). Für die Informationsbewertungsphase müssen diese Steckbriefe, auf Grundlage von Datenschema und Relationsmodell, in ein geeignetes Format für die Informationsbewertungsphase gebracht werden (vgl. Abschnitt 5.3). Diese Überführung wird durch den Einsatz einer VBA-Anwendung erreicht. Nach VDI 5610 eignet sich diese Skriptsprache insbesondere für die Steuerung von Microsoft-Office-Anwendungen [187] und zur Verarbeitungen von listenbasierten Informationsspeichern. Die Inhalte der Steckbriefe werden in Listenform dokumentiert und durch den Einsatz der VBA-Anwendung in ein CSV-Format als Schnittstelle zur MATLAB-Anwendung überführt. Während der Informationsverarbeitung ist zwischen der Definition der Knoten und Kanten zu unterscheiden. Entsprechend dem Datenschema werden in der Knotendefinition die Inhalte der Steckbriefe in Listenform dokumentiert und den Knoten als Attribute zugeordnet. Im rechten Teil von Abbildung 6.3 ist die Dokumentation der Knotenattribute in Listenform dargestellt. Jedes Knotenelement des TFG lässt sich über die ID eindeutig identifizieren. Die ID wird darüber hinaus auch für die Kantenbeschreibung genutzt. Es gilt zu berücksichtigen, dass aufgrund der Struktur des TFG nicht für jeden Knotentyp sämtliche Attribute definiert werden müssen. In Anhang A.17 ist eine Übersicht dargestellt, aus der ersichtlich wird, welche Knotenattribute für welchen Knotentyp zu definieren sind. Diese Zuweisung schafft ein einheitliches Schema für die Schnittstelle zwischen VBA- und MATLAB-Anwendung und ermöglicht eine spätere Adaption der Umsetzung auf spezifische Technologiefelder.

### Steckbriefe

### Knotenbeschreibung

ID	Typ	Titel	Beschreibung	Definiertes Realisierungsdatum	Definierte Kosten	Relevanz	Erstellt
1	Szenario	Gesamtszenario	Automatisches Laden im privaten Umfeld	01.12.2019/01.01.05.2020/01.06.2020/01.01.05.2020/9	1.000 €	3	...
2	Szenario	Parken & Laden öffentlich	Volldomestisches Parken und Laden in öffentlichen Parkhäusern	01.12.2019/01.01.05.2020/01.06.2020/01.01.05.2020/9	45.000 €	2	...
3	Szenario	Werkzeug der Zukunft	Automatisierung von Serviceprozessen	01.12.2019/01.01.05.2020/01.06.2020/01.01.05.2020/6	1.500.000 €	1	...
4	Szenario	Logistik	Volldomestische Parkraumverteilung bis ins Fahrzeug	01.12.2019/01.01.05.2020/01.06.2020/01.01.05.2020/2	...	...	...
5	UseCase	Laden	Elektrofahrzeuge werden automatisch geladen	...	...	...	...
6	UseCase	Parken	Fahrzeuge werden in einem eingeschränkten Bereich automatisch geparkt	...	...	...	...
7	UseCase	Innenraumreinigung	Reinigung des Fahrzeuginneren	...	...	...	...
8	UseCase	Außenreinigung	Reinigung der Fahrzeugaußenhaut, insbesondere Sensoren	...	...	...	...
9	UseCase	Radenwechsel	Radenwechsel aufgrund von Verschleiß/Schaden	...	...	...	...
10	UseCase	Kommunikation herstellen	Kommunikation zum Fahrzeug herstellen	...	...	...	...
11	UseCase	Fahrzeug erkennen	Aufmerksamkeit des Fahrzeugs erkennen	...	...	...	...
12	UseCase	Ladestecker aufnehmen	Stecker aus der Abstecker-Schleuse ziehen	...	...	...	...
13	UseCase	Zielbereich erkennen	Bereich in dem das Objekt abgefragt werden soll abgrenzen	...	...	...	...
14	UseCase	Werkzeug bewegen	Werkzeug zum Zielbereich bewegen	...	...	...	...
15	UseCase	Personen erkennen	Relevante Personen im Umfeld wahrnehmen	...	...	...	...
16	UseCase	Türen öffnen	Fahrzeugtüren öffnen	...	...	...	...

### Kantenbeschreibung

Szenario-Use-Zuordnung	ID1	ID2	ID3	ID5	UseCase-Funktion-Zuordnung	ID7	ID8	ID9	ID10	ID11	Funktion-Technologie-Zuordnung	ID12	ID13	ID14	ID15	ID16	ID17	ID18
Gesamtszenario	1	1	1	1	Laden	1	1	1	1	1	Kommunikation herstellen	1	1	1	1	1	1	1
Parken & Laden öffentlich	1	1	1	1	Parken	1	1	1	1	1	LIDAR	1	1	1	1	1	1	1
Werkzeug der Zukunft	1	1	1	1	Innenraumreinigung	1	1	1	1	1	Soft Robotics	1	1	1	1	1	1	1
Logistik	1	1	1	1	Außenreinigung	1	1	1	1	1	5G	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	Radenwechsel	1	1	1	1	1	WLAN/p	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1		1	1	1	1	1	Pneumatische Greifer	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1		1	1	1	1	1	Elektrische Greifer	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1		1	1	1	1	1	Mobile Robotik	1	1	1	1	1	1	1

Zuordnung über ID

**Abbildung 6.3:** Definition von Knotenattributen und Kanten für das Datenschema

Die Definition der Kanten erfolgt in einem mehrstufigen Vorgehen entsprechend dem Relationsmodell (vgl. Abschnitt 5.3.2). Hierbei werden in mehreren Ansichten die Knotenelemente gegenübergestellt, die inzidente Kanten besitzen können, und die Relationsmatrizen beschrieben.



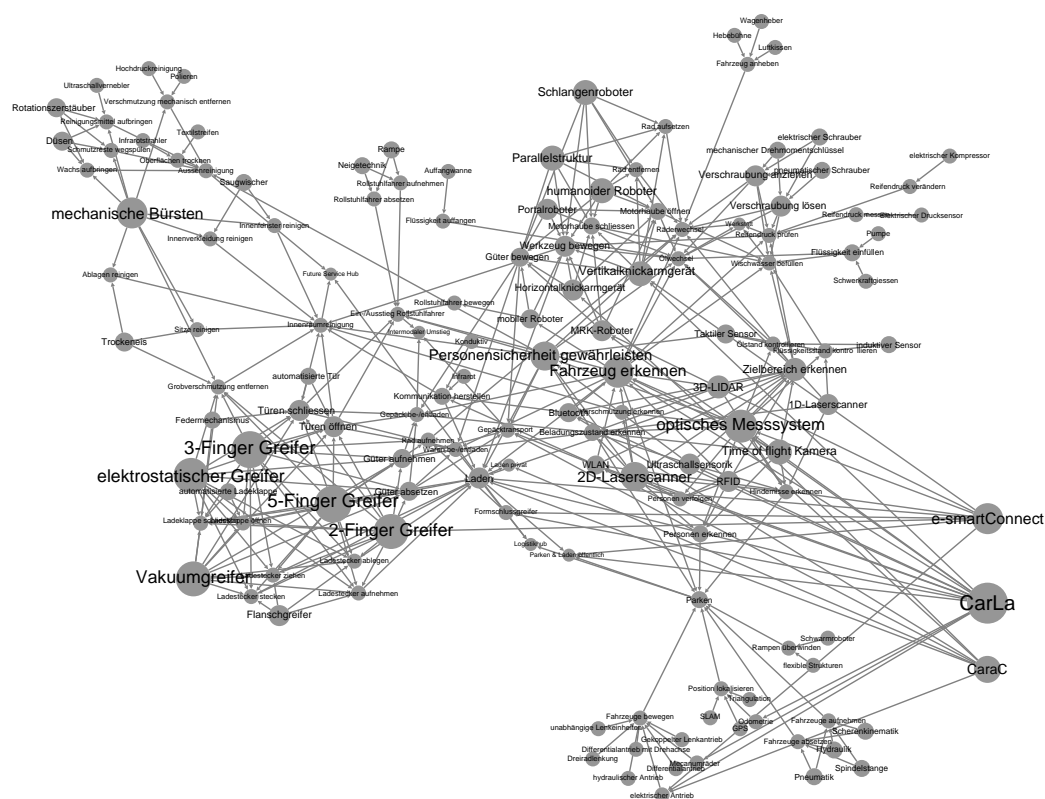
Zunächst werden Szenarien und Use Cases gegenübergestellt und die entsprechenden Kanten definiert (vgl. Abbildung 6.3). Sukzessive werden die Knotenelemente der tieferen Ebenen des TFG nach dem Top-Down Prinzip paarweise gegenübergestellt und die Kanten definiert. Als Ergebnis sind die Relationsmatrizen  ${}^U\mathbf{A}_S, \dots, {}^K\mathbf{A}_S$  beschrieben. Die Kantenbeschreibung mit Hilfe von Relationsmatrizen ist im unteren Teil von Abbildung 6.3 dargestellt. Die eindeutige ID ermöglicht die Verknüpfung mit den entsprechenden Knotenattributen. Der Vorteil dieses listenbasierten Vorgehens liegt in der intuitiven Anwendbarkeit für den Benutzer und der einfachen Verarbeitung der Ausgangsdaten. Für die weitere Verarbeitung im Rahmen der MATLAB-basierten Informationsbewertungsphase werden die Kantenbeschreibungen ebenfalls in ein CSV-Format überführt. Knoten und Kanten des Technologiefeldgraphen sind in separaten Listen beschrieben. Die Verknüpfung zwischen den Listen erfolgt über die eindeutige Knoten-ID.

**Informationsbewertung** Die aufbereiteten Ergebnisse der Informationsverarbeitung bilden die Grundlage für die Bewertungsphase. Als Eingangsgröße sind die geforderten Reifegrade  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^S(S, t)$ , die geforderten Kosten  $HK_{\text{gef}}^S(S)$  und mit  $Rel^S(S)$  die Relevanz der Szenarien definiert. Für die Ebene der Technologien sind zudem die individuellen Reifegradverläufe  $\mathbf{TRL}_{\text{real}}^T(T, t)$  definiert. Die letzten Eingangsgrößen bilden die Kennwerte der Konzeptebene. Hier sind die realistischen Kosten  $HK_{\text{real}}^K(K, t)$  und die Reifegradverläufe  $\mathbf{TRL}_{\text{real}}^K(K, t)$  der Konzepte bekannt (vgl. Abschnitt 5.3.1). Entsprechend den Ausführungen aus Abschnitt 5.4 erfolgt im Rahmen der MATLAB-Anwendung zunächst die Berechnung von Abhängigkeit und Relevanz der Knotenelemente. Weiterhin werden der Handlungsbedarf bestimmt und die Priorisierung vorgenommen. Die Ergebnisse für Handlungsbedarf und Priorisierung können im Rahmen der Bewertung für eine erste Analyse des Technologiefelds herangezogen werden. Aufgrund der potenziell hohen Anzahl von Knotenelementen innerhalb des TFG ist diese Auswertung jedoch nur bedingt zielführend und eine Beschränkung auf Knotenelemente mit sehr hoher Priorität oder hohem Handlungsbedarf sinnvoll.

Die in der Informationsbewertungsphase bestimmten Kenngrößen werden als Attribute der Knotenelemente in den Technologiefeldgraphen zurückgeführt. Der Graph wird in seinem Informationsgehalt verdichtet. Analog zum primären Datenschema werden Kennwerte selektiv den Knotenelementen zugeordnet. Welche Attribute für welchen Knotentyp zu bestimmen sind, ist durch das erweiterte Datenschema, dargestellt in Anhang A.18, definiert. Als Ausgabeformat der MATLAB-Anwendung wird das CSV-Format aus der Informationsverarbeitung ergänzt. Die berechneten Kennwerte der Bewertungsphase werden in die Knotenbeschreibung eingefügt, hierbei wird die Erweiterbarkeit des CSV-Formats genutzt. Die Beschreibung der Kanten erfolgt ebenfalls in Listenform. Jedoch muss für die Verwendung in GEPHI die Matrixdarstellung in eine Kantenliste überführt werden (vgl. Abschnitt 4.3). Hierbei werden die Kanten des Graphen durch ihren Quell- und Zielknoten beschrieben und jeder Zuweisung eine individuelle ID zugewiesen. Sowohl Knoten als auch Kanten sind als Elemente in separaten CSV-Formaten definiert.

Ergänzend zur Listendarstellung wird der Technologiefeldgraph im GEXF-Datenformat beschrieben. Das GEXF-Datenformat baut auf der UML-Syntax auf und ist insbesondere für die Darstellung dynamischer und attribuerter Graphen geeignet. Durch das GEXF-Format besteht die Möglichkeit, den Attributen der Knotenelemente einen Gültigkeitsbereich zuzuweisen. Somit können insbesondere die zeitlichen Reifegradverläufe und Entwicklungen von Handlungsbedarfen innerhalb des TFG abgebildet werden. [65]

**Visualisierung** Zur Visualisierung der Ergebnisse wird auf die Graphensoftware GEPHI zurückgegriffen, welche umfassende Werkzeuge zur Analyse und Darstellung von Graphen bereitstellt (vgl. Abschnitt 4.4). Die Repräsentation des Technologiefeldgraphen im GEXF-Format ermöglicht die Darstellung dynamischer Entwicklungsvorgänge durch die Veränderungen der Knotenattribute über den Zeitverlauf. Zudem können durch die Breiten- und Tiefensuche Wege innerhalb des Graphen identifiziert und Abhängigkeitsverhältnisse zwischen beliebigen Knotenelementen bestimmt werden. Beispielsweise lässt sich auf diese Weise bestimmen, welche Technologien für ein Szenario potenziell relevant sind. Durch die Anwendung von Filteroperationen können die Ergebnisse auf Grundlage der Knotenattribute sortiert und bewertet werden. Für den Anwender ergibt sich ein intuitives Werkzeug, um die Abhängigkeiten, Prioritäten und Handlungsbedarfe innerhalb des Technologiefelds zu interpretieren. In Abbildung 6.4 ist die Visualisierung anhand eines Beispiels dargestellt.



**Abbildung 6.4:** Umsetzung der Visualisierung in GEPHI

Für die Visualisierung der Bewertungsergebnisse im Technologiefeldgraphen stehen unterschiedliche Ansätze zur Verfügung. Als maßgebende Unterscheidungsmerkmale können die Knotenelemente in ihrem Durchmesser und in ihrer Füllung unterschiedlich dargestellt werden. Im Rahmen der verfolgten Umsetzung wird die Priorisierung über den Durchmesser der Knotenelemente beschrieben, der Handlungsbedarf wird über eine Darstellung der Außenkontur des Knotenelementes dargestellt. Durch die Anwendung kräftebasierter Layoutverfahren können zudem stark vernetzte Bereiche des Technologiefelds visualisiert werden. Ferner kann eine Clustering von Knotenelementen, die isolierte Themenbereiche beschreiben, erreicht werden (vgl. Abschnitt 5.4.6).

Ergänzend zur Berechnung knotenspezifischer Kennwerte durch MATLAB wird GEPHI zur statistischen Analyse des Technologiefeldgraphen verwendet. So wird die Verteilungen der Knotenattribute in Histogrammen ausgewertet und eine makroskopische Betrachtung des Technologiefelds erreicht. Mit dieser makroskopischen Betrachtung lassen sich, auf Grundlage von Mittelwert und Standardabweichungen, übergeordnete Aussagen über das Technologiefeld treffen. Besitzt ein Technologiefeld beispielsweise viele Knotenelemente mit hohem Handlungsbedarf, ist die Bearbeitung und Weiterentwicklung des Technologiefelds mit einem hohen Ressourcenaufwand verbunden, da potenziell viele Technologien in ihrem Reifegrad gesteigert werden müssen. Diese Bewertungen lehnen sich an die Makroanalysen der Graphentheorie an (vgl. Abschnitt 4.2.3).

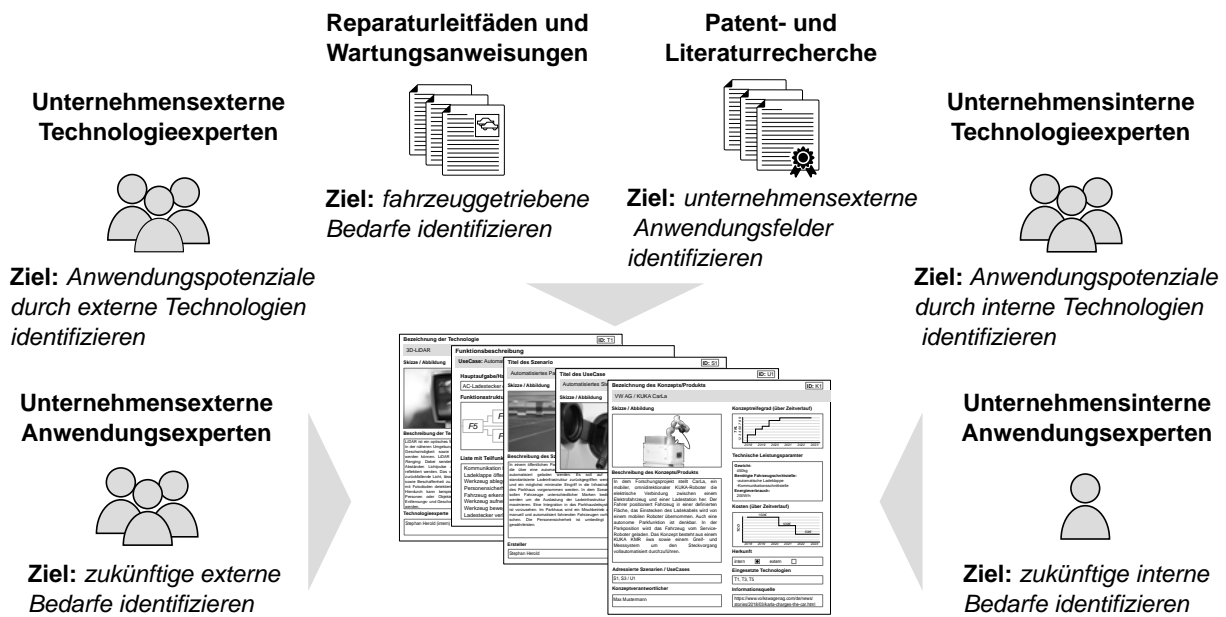
Durch die beschriebene Umsetzung des Methodenansatzes wird die Möglichkeit zur systematischen Analyse von Technologiefeldern geschaffen. Mit der Überführung der Steckbriefe in ein konsistentes Datenformat fungiert die VBA-Anwendung als Eingangsschnittstelle. Die Datengrundlage wird durch die Bewertungsphase verdichtet und die für den Anwender relevanten Kenngrößen werden dynamisch ermittelt. Durch die Rückführung der Ergebnisse in das Datenformat wird die Möglichkeit zur Graphenvisualisierung in GEPHI eröffnet. Insbesondere die modulare Struktur der Prozesskette ermöglicht die spätere Adaption und Integration in bestehende Bewertungsverfahren der strategischen Technologieplanung und softwaremäßige Umsetzung als interaktives Werkzeug, beispielsweise in einer Web-Anwendung.

## 6.2 Analyse des Technologiefelds Automotive Service Robotics

Zur Analyse des Technologiefelds ASR wird zunächst die Informationsgrundlage durch verschiedene Workshops sowie Literatur- und Patentrecherchen geschaffen. Die Ergebnisse werden im Anschluss in der Toolchain verarbeitet und bewertet. Den Abschluss bildet die Visualisierung der Ergebnisse in Form eines Graphen und einer Technologieroadmap. Als Ergebnis werden technologische und konzeptionelle Whitespots beschrieben, die im weiteren Verlauf von Kapitel 6 geschlossen und in den Graphen zurückgeführt werden. Auf Grundlage dieser Entwicklungsschleife wird abschließend eine Validierung des Methodenansatzes vorgenommen.

**Beschaffungsphase** Zu Beginn der Informationsbeschaffungsphase werden durch Kreativworkshops sowie Literatur- und Patentrecherchen die Szenarien und Use Cases des zu untersuchenden Technologiefelds beschrieben. Um das Technologiefeld ASR möglichst detailliert zu beschreiben, werden entsprechende Workshops mit unterschiedlichen Stakeholdern durchgeführt. Somit werden eine einseitige Beschreibung des Technologiefelds vermieden und sowohl Technologiepotenziale als auch Marktbedarfe berücksichtigt. In Abbildung 6.5 sind die Informationsquellen zur Beschreibung von Szenarien und Use Cases für ASR dargestellt.

Bei den Workshops wird zwischen Anwendungs- und Technologieexperten unterschieden. Als Anwendungsexperten können solche Personen verstanden werden, die in ihrem täglichen Arbeitsumfeld mit der Umsetzung neuer Applikationen durch den Einsatz verschiedener Technologien betraut sind. Dieser Personenkreis repräsentiert insbesondere den Bedarf für neue Applikationen oder Technologien. Hingegen werden unter Technologieexperten solche Personen verstanden, die mit der Weiterentwicklung von Technologien, in diesem Fall im Bereich der Robotik, ohne direkten Bezug zu einer Anwendung oder Applikation betraut sind.



**Abbildung 6.5:** Identifikation von Szenarien und Use Cases für Automotive Service Robotics

Durch diesen Personenkreis werden die technologischen Potenziale verkörpert. Weiterhin wird zwischen unternehmensinternen und unternehmensexternen Teilnehmergruppen unterschieden. Durch die Kombination beider Sichtweisen wird eine einseitige Beschreibung des Technologiefelds vermieden und eine breitere Zahl von Szenarien und Use Cases definiert werden. Ergänzt werden die Workshops durch eine Literatur- und eine Patentrecherche. Hierdurch wird der bestehende Stand der Technik in der Beschreibung des Technologiefelds berücksichtigt. Insbesondere die Recherche von Reparatur- und Wartungsleitfäden ist von besonderem Interesse, da hierdurch viele potenzielle Use Cases identifizierbar sind, die aktuell manuell durchgeführt werden.

Der Ablauf der Workshops lässt sich in drei Phasen aufteilen. In der Einführungsphase werden die Teilnehmer zunächst an das Technologiefeld herangeführt und so ein gemeinsames Verständnis für die Zielstellung des Workshops geschaffen. Dies erfolgt beispielsweise durch die Präsentation bestehender Konzepte. In der Kreativphase wird der Lösungsraum durch die Teilnehmer beschrieben und zunächst eine möglichst große Anzahl von Szenarien und Use Cases definiert. Dieser Lösungsraum wird in der Dokumentationsphase wieder auf eine eingeschränkte Anzahl reduziert, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten und eine erste Priorisierung auf relevante Elemente vorzunehmen. Die Dokumentation der Ergebnisse erfolgt in Form von Steckbriefen wie in Abschnitt 5.2 beschrieben. In Abbildung 6.6 ist auszugsweise die Kreativphase aus einem Workshop mit unternehmensexternen Technologieexperten dargestellt. Die konsolidierten Ergebnisse der Workshops mit den identifizierten Use Cases und Szenarien sind in Anhang A.20 dokumentiert. An die Definition von Szenarien und Use Cases schließt sich die Ableitung von Funktionsbeschreibungen an. In Anlehnung an das in Abschnitt 5.2 beschriebene Vorgehen werden die Use Cases zunächst in ihre Einzelfunktionen zergliedert und diese im Anschluss zu einer Funktionsstruktur zusammengefügt. Diese Funktionen dienen als Verknüpfungsebene zwischen Use Cases und Technologien innerhalb des TFG. Die Erfassung der Funktionsstrukturen erfolgt losgelöst von der Workshopphase mit Unterstützung von Methodenexperten.



**Abbildung 6.6:** Ergebnisdokumentation im Rahmen der Workshops

Den Abschluss der Informationsbeschaffung stellt die Identifikation und Dokumentation von relevanten Technologien und Konzepten dar. Dies erfolgt für die Analyse des Technologiefelds ASR zunächst durch eine Literaturrecherche auf Grundlage der Einzelfunktionen. Potenziell relevante Technologien werden in Diskussionen mit den Technologieexperten der Workshops in Form von Steckbriefen dokumentiert (vgl. Abschnitt 5.2). Ergänzend werden in einer Patenthäufigkeits- und Patentverflechtungsanalyse bestehende Konzepte identifiziert. Durch die Berücksichtigung unternehmensexterner Informationsquellen wird sichergestellt, dass auch eine externe Beschaffung von Technologien und Konzepten in der Bewertung berücksichtigt wird. Die Ergebnisse der Patentanalyse für das Technologiefeld ASR mit den prägenden Themenfeldern sind in einer Patentlandkarte in Anhang A.21 dargestellt.

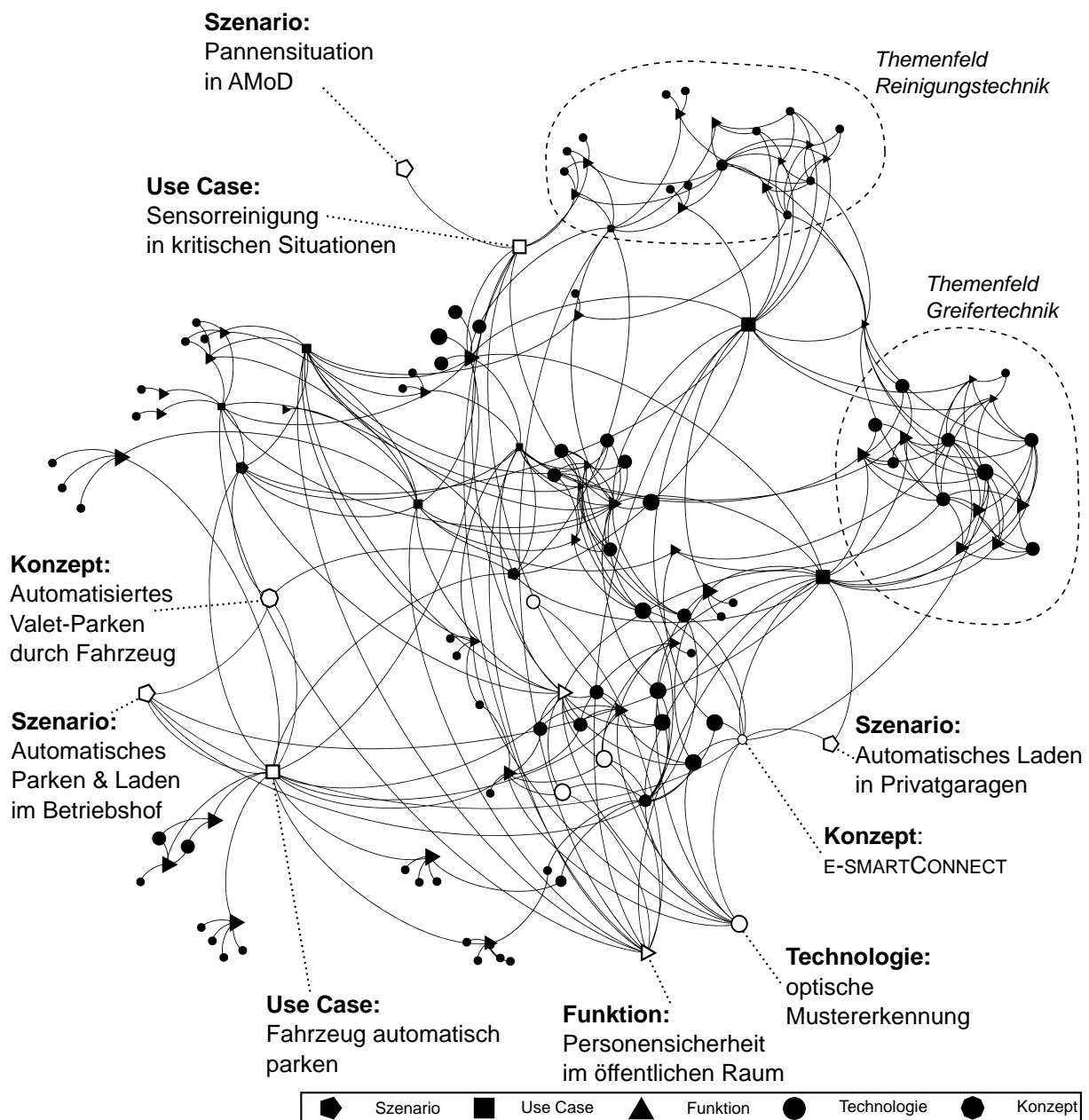
**Verarbeitungsphase** Mit dem Abschluss der Beschaffungsphase liegt eine Informationsgrundlage für die Beschreibung des Technologiefelds ASR in Form von Steckbriefen vor. Diese Informationsgrundlage wird mit der in Abschnitt 6.1 beschriebenen Toolchain in einen Technologiefeldgraphen überführt. Um die Abhängigkeit zwischen den Knotenelementen adäquat abzubilden, werden diese im Dialog mit den auf den Steckbriefen dokumentierten Erstellern abgestimmt. Auf eine detaillierte Beschreibung der Verarbeitungsphase wird an dieser Stelle verzichtet, da das Vorgehen bereits im Rahmen von Abschnitt 6.1 beschrieben ist.

**Bewertungsphase** Als Ergebnis der Informationsverarbeitungsphase ist das Technologiefeld ASR in Form eines Technologiefeldgraphen beschrieben. Unter Anwendung der zuvor beschriebenen Umsetzung des Methodenansatzes folgen die Bewertung der Knotenelemente und eine Ableitung von Handlungsempfehlungen. Diese werden im Rahmen der Weiterentwicklung des Technologiefelds (vgl. Abschnitt 6.3) umgesetzt. In Abbildung 6.7 ist der Technologiefeldgraph für ASR für einen Zeitpunkt  $t_k$  dargestellt, zu dem die Anforderungen aller Szenarien auf das Technologiefeld einwirken und die Technologien ihren maximal prognostizierten Reifegrad erreicht haben. Diese Darstellung gleicht einem Trendszenario, in dem alle technologischen Entwicklungen unbeeinflusst von exogenen Randbedingungen ablaufen würden. Somit kann der maximale Handlungsbedarf identifiziert werden. Die Ebenen des Technologiefeldgraphen lassen sich aufgrund unterschiedlicher Knotensymbole differenzieren. Es ist erkennbar, dass aus einer geringen Anzahl Szenarien bereits eine große Anzahl potenziell relevanter Technologien

resultiert. Dies begründet sich in der Struktur des Technologiefeldgraphen. Durch das Relationsmodell (vgl. Abschnitt 5.3.2) ist eine hierarchische Struktur vorgegeben, und insbesondere die Ebene der Funktionen sorgt für eine große Anzahl von Knotenelementen in den unteren Ebenen des TFG. Das Technologiefeld ASR wird in dem dargestellten Graphen durch  $n_V = 141$  Knoten und  $n_E = 324$  gerichtete Kanten beschrieben. Für die Ebene der Szenarien sind  $n_S = 5$  Knotenelemente beschrieben. Zu diesen Szenarien ergeben sich  $n_U = 9$  adjazente Use Cases. Auf der Funktionsebene sind  $n_F = 44$  Knotenelemente definiert und  $n_T = 80$  adjazente Technologien im Graphen beschrieben. Auf der unteren Ebene sind  $n_K = 3$  Konzepte definiert. Die geringe Anzahl der Konzepte resultiert aus der frühen Phase des Technologiefelds.

Durch die Anwendung kräftebasierter Layoutverfahren lassen sich zwei Bereiche des Graphen identifizieren, die aufgrund ihrer starken Abhängigkeitsverhältnisse zu einem Cluster zusammengefasst werden können. Dies gilt für das Themenfeld *Reinigungstechnik* und das Themenfeld *Handhabung*. Diese besitzen eine starke innere Vernetzung auf den Ebenen der Funktionen und Technologien und nur eine eingeschränkte Anzahl inzidenter Kanten zur Ebene der Use Cases. Entsprechend sind diese Themenfelder potenziell für eine isolierte Betrachtung geeignet. Durch die Definition der Relevanz können die Steckbriefe der Szenarien im Sinne der Unternehmensstrategie priorisiert und an der Produkt- und Technologiestrategie des Unternehmens ausgerichtet werden. Die Prioritäten der obersten Ebene des Technologiefeldgraphen sind extern aufgeprägt. Entsprechend dem Methodenansatz ergeben sich durch die Relationen die Prioritäten für die Knotenelemente der unteren Ebene des Graphen (vgl. Abschnitt 5.4.5). Erkennbar ist, dass insbesondere im mittleren Bereich der Graphendarstellung die Technologien mit einer hohen Priorität, dargestellt durch den Knotendurchmesser, beschrieben sind. Für die weitere Analyse wird anhand der Knotenelemente, für die ein Handlungsbedarf besteht, der Technologiefeldgraph genauer betrachtet und der Bedarf hergeleitet.

In Abbildung 6.7 sind monetärer und technologischer Handlungsbedarf überlagert dargestellt und die entsprechenden Knotenelemente hervorgehoben, indem die Elemente in der Knotendarstellung nicht ausgefüllt und nur in ihrer Umrandung dargestellt werden. Auf der Ebene der Szenarien besteht für  $n = 3$  Knotenelemente ein Handlungsbedarf. Für das Szenario *Automatisches Parken und Laden im Betriebshof* besteht ein technologischer Handlungsbedarf von  $NFA_{\text{tech|real}}^S = 3$ . Dies begründet sich aus der Ebene der Konzepte. Durch das Szenario wird ein vollautomatisches Parken und Laden von aktuellen Fahrzeuggenerationen mit einer Reifegradstufe von  $TRL_{\text{gef}} = 6$ , also ein Prototyp im realen Umfeld, gefordert. Hierzu müssen die adjazenten Use Cases bedient werden. Für den Use Case *Ladestecker automatisch stecken* ist durch das Konzept E-SMARTCONNECT (vgl. Abschnitt 2.2) bereits ein entsprechender Technologiereifegrad sichergestellt. Für den Use Case *Fahrzeug automatisch parken* ist zum aktuellen Zeitpunkt  $t_k$  lediglich das Konzept *automatisiertes Valet-Parken durch Fahrzeug* im Graphen definiert. Fahrzeuge mit einer automatisierten Valet-Parken-Funktion werden zukünftig in der Lage sein, freie Parkplätze innerhalb eines Parkhauses selbstständig anzufahren. Eine erste Machbarkeit zeigt beispielsweise das Projekt V-Charge [26, 51]. Dieses Konzept besitzt zum aktuellen Zeitpunkt einen Reifegrad von  $TRL_{\text{real}} = 3$ , der Nachweis der Konzeptbeschreibung ist im Rahmen des Projekts V-Charge erfolgt. Die Reifegradanforderungen des Szenarios werden somit nicht erfüllt. Entsprechend begründet sich der Handlungsbedarf für das Szenario und den adjazenten Use Case *Fahrzeug automatisch parken*. Dieser Handlungsbedarf wird auch auf das Konzept *automatisiertes Valet-Parken durch Fahrzeug* projiziert.



**Abbildung 6.7:** Technologiefeldgraph für Automotive Service Robotics

Das zweite Szenario, für das ein Handlungsbedarf besteht, ist das *automatische Laden in Privatgaragen*. Hierbei handelt es sich um einen monetären Handlungsbedarf  $NFA_{mon|real}^S$ . Für das Szenario besteht eine inzidente Kante zum Konzept E-SMARTCONNECT, was bedeutet, dass dieses Konzept theoretisch in der Lage ist das Szenario zu realisieren. Jedoch erfüllt das Konzept die Kostenanforderungen des Szenarios nicht. Das Konzept E-SMARTCONNECT ist primär für den Einsatz im öffentlichen Raum und die kommerzielle Nutzung durch einen Betreiber ausgelegt und durch den Einsatz eines KUKA LBR IIWA [86] durch hohe Kosten geprägt. Für das Szenario *automatisches Laden in Privatgaragen* steht dem eine geringe Zahlungsbereitschaft des Kunden gegenüber, da von einer individuellen Nutzung ausgegangen wird. Die divergierenden Kosten verursachen einen Handlungsbedarf, der sowohl auf Seiten des Szenarios als auch auf Seiten

des Konzepts abgebildet wird. Im Technologiefeldgraphen (vgl. Abbildung 6.7) sind entsprechend sowohl das Szenario als auch das adjazente Konzept E-SMARTCONNECT als defizitäre Knotenelemente ausschließlich in ihren Umrandungen dargestellt.

Das Szenario *Pannensituation in AMoD-Systemen* bildet den dritten Handlungsbedarf auf Szenarioebene. Das Szenario beschreibt den Bedarf nach einer dezentralen Sensorreinigung für den Fall einer starken Sensorverschmutzung und dem daraus resultierenden Ausfall eines automatisierten Fahrzeugs in einem Mobility-on-Demand-System. Als relevanter Use Case für dieses Szenario wird die *Sensorreinigung in kritischen Situationen* betrachtet. Für das Szenario besteht ein technologischer Handlungsbedarf von  $NFA_{tech|real}^S = 6$ . Durch den TFG ist kein adjazenter Konzeptknoten definiert, entsprechend können die szenarioseitig gesetzten Anforderungen nach einem Funktionsaufbau im Labor ( $TRL_{gef} = 6$ ) nicht erfüllt werden. Der entsprechende Handlungsbedarf projiziert sich auch auf die Ebene des Use Case und resultiert dort ebenfalls in einem konzeptorientierten Handlungsbedarf von  $NFA_{tech|real}^{U|max} = 6$ . Für die Funktionen des Use Case sind innerhalb des TFG bereits Technologien mit einem ausreichenden Reifegrad definiert, sodass ein technologisch orientierter Handlungsbedarf für den Use Case ausbleibt (vgl. Abschnitt 5.4.5).

Neben einem Handlungsbedarf auf Szenario-, Use Case- und Konzeptebene sind auch auf der Funktions- und Technologieebene Handlungsbedarfe erkennbar. Die Funktion *Personensicherheit im öffentlichen Raum* ist als eine Querschnittsfunktion zu sehen, die in vielen Use Cases zum Einsatz kommt und entsprechend eine hohe Relevanz besitzt. Dieser hohen Relevanz steht eine geringe Anzahl adjazenter Technologien gegenüber, sodass eine hohe Priorität für die Funktion der Personensicherheit resultiert (vgl. Abschnitt 5.4.5). Da aktuelle Sicherheitskonzepte aus der Produktion nur eingeschränkt für den Einsatz im öffentlichen Raum geeignet sind, können die Reifegradanforderungen des Szenarios *Pannensituationen in AMoD-Systemen* nicht erfüllt werden und ein entsprechender Handlungsbedarf resultiert. Dieser Handlungsbedarf schlägt sich auf die Technologien nieder, die eine inzidente Kante zu dieser Funktion aufweisen.

Die Technologie der *optischen Mustererkennung* lässt sich als eine Schlüsseltechnologie des Technologiefelds ASR identifizieren, da die funktions- und konzeptorientierte Relevanz hohe Werte aufweist und eine entsprechend hohe Priorisierung zur Folge hat. Der Handlungsbedarf für die Technologie resultiert aus den Szenarien *Automatisches Laden in Privatgaragen* und der *Pannensituation in AMoD-Systemen*. Für die Technologie wurde der unternehmensinterne Reifegrad durch die Technologieexperten als gering eingeschätzt, sodass die szenarioseitigen Anforderungen nicht erfüllt werden können. Entsprechend besteht für diese Technologie ein Handlungsbedarf  $NFA_{tech|theo}^{T|max}$ .

Durch die Bestimmung der Prioritäten lässt sich die Bedeutung einzelner Knotenelemente für die Entwicklung des Technologiefelds abschätzen. Die drei Szenarien mit einem Handlungsbedarf weisen für das Technologiefeld ASR eine identische Priorität auf. Auf der Ebene der Use Cases kann dem Use Case *Fahrzeug automatisch parken* eine höhere Priorität zugewiesen werden als dem Use Case *Sensorreinigung in kritischen Situationen*. Dies begründet sich durch die höhere Relevanz  $REL_{kum}^U$ , da der Use Case in drei Szenarien Anwendung findet. Für die Ebene der Funktionen besteht lediglich für ein Knotenelement ein Handlungsbedarf, sodass die Priorisierung eine untergeordnete Rolle spielt. Auf der Ebene der Technologien weisen insgesamt vier Knotenelemente einen Handlungsbedarf auf. Die Technologie *optische Mustererkennung* ist aufgrund ihrer hohen Relevanz in Bezug auf die Szenarien  $REL_{kum}^T$  und Konzepte  $REL_{real}^T$  mit der höchsten Priorität bewertet. Auf Konzeptebene ergibt sich für das Konzept *automatisiertes*

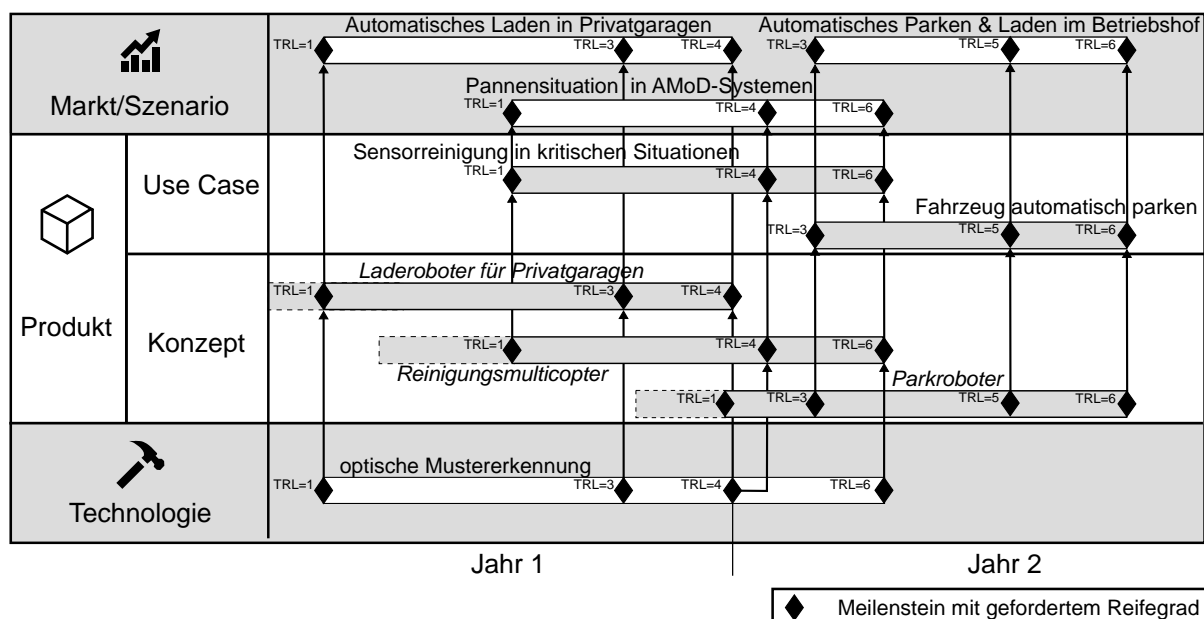


*Valet-Parken durch Fahrzeug* die höchste Priorität. Dies begründet sich in der hohen Relevanz für die Szenarioebene, da viele Szenarien des TFG eine automatisierte Fahrfunktion voraussetzen. Das Konzept E-SMARTCONNECT besitzt eine vergleichsweise geringe Relevanz innerhalb der Szenarien.

Durch die Graphendarstellung können die technologischen und monetären Abhängigkeiten innerhalb des Technologiefelds dargestellt werden. Den nächsten Schritt bildet die Visualisierung der zeitlichen Abhängigkeiten in Form einer Technologieroadmap. Hierbei werden die im Datenformat beschriebenen zeitlichen Entwicklungen der Knotenelemente in eine zweidimensionale Darstellung überführt (vgl. Abschnitt 5.4.7). Gleichzeitig wird durch die Roadmap festgelegt, wie die entsprechenden Handlungsbedarfe geschlossen werden sollen und welche Meilensteine hieraus resultieren.

**Roadmapableitung** In Abbildung 6.8 ist die aus dem TFG abgeleitete Roadmap für ASR dargestellt. Auf der Ebene Markt/Szenario sind die Knotenelemente des Graphen aufgetragen, für die ein Handlungsbedarf besteht. Zudem sind die Zeitpunkte, zu denen eine Steigerung des Technologiereifegrads gefordert wird, als Meilensteine beschrieben. Hier lässt sich erkennen, dass für die Szenarien keine zeitgleiche Steigerung des Reifegrads gefordert wird und eine versetzte Bearbeitung möglich ist.

Auf der Ebene der Use Cases ist dieser Handlungsbedarf mit den entsprechenden Reifegradmeilensteinen heruntergebrochen. Analog zum TFG ergeben sich die Handlungsbedarfe für die Use Cases *Sensorreinigung in kritischen Situationen* und *Fahrzeug automatisch parken*. Für das Szenario *Automatisches Laden in Privatgaragen* besteht zwar ein Handlungsbedarf, jedoch ist dieser monetärer Art und kann nicht auf die Ebene der Use Cases projiziert werden (vgl. Abschnitt 5.4.5). Entsprechend ist der Use Case *Ladestecker automatisch stecken* nicht in der Roadmap dargestellt und der Handlungsbedarf wird direkt dem Konzept zugeordnet.



**Abbildung 6.8:** Roadmap für das Technologiefeld Automotive Service Robotics

In der Ebene der Konzepte wird festgelegt, wie der Handlungsbedarf auf Use Case- und Szenarioebene geschlossen werden soll. Hierbei wird die Neuentwicklung von drei Konzepten verfolgt. Um den monetären Bedarf für das Szenario *Laden in Privatgaragen* zu schließen, soll das Konzept eines *Laderoboters für Privatgaragen* betrachtet werden. Im Rahmen des TFG ist für das Szenario ebenfalls das adjazente Konzept E-SMARTCONNECT definiert, sodass alternativ auch eine Kostenreduzierung durch Anpassung des Konzepts möglich wäre. Jedoch wird das Kostensenkungspotenzial durch die eingesetzte Robotertechnik als gering eingeschätzt und die Verfolgung eines neuen Konzepts bevorzugt. Um den Handlungsbedarf für den Use Case *Sensorreinigung in kritischen Situationen* zu schließen, soll das Konzept eines *Reinigungsmulticopters* verfolgt werden. Durch den TFG sind die potenziell geeigneten Technologien bekannt, sodass eine Konzeptentwicklung hierauf aufbauen kann. Der geforderte finale Reifegrad für das Konzept von  $TRL_{\text{gef}} = 6$  ergibt sich aus dem Szenario, ebenfalls der entsprechende Zeitpunkt. Als drittes Konzept wird zur Adressierung des Use Case *Fahrzeug automatisch parken* das Konzept eines *Parkroboters* verfolgt. Durch den TFG ist ebenfalls das Konzept des *automatisierten Valet-Parkens durch Fahrzeug* beschrieben, jedoch erreicht dieses Konzept erst zu einem späteren Zeitpunkt das geforderte Reifegradniveau und eine Beschleunigung des Entwicklungsvorgangs ist aufgrund der langen Entwicklungszyklen der Automobilindustrie nur eingeschränkt möglich. Aus diesem Grund wird eine Konzeptneuentwicklung verfolgt, um die Handlungsbedarfe zu decken. Der geforderte finale Reifegrad für das Konzept ergibt sich zu  $TRL_{\text{gef}} = 6$ .

Neben der Konzeptentwicklung ist eine Technologieentwicklung für die Umsetzung der Konzepte notwendig. Diese ist auf der entsprechenden Ebene der Roadmap für die Technologie *optische Mustererkennung* dargestellt. Durch den TFG ist bereits die hohe Priorität des Knotenelements beschrieben worden. In der Roadmapdarstellung wird darüber hinaus noch der Einfluss der Technologieentwicklung auf die Konzepte beschrieben. Sowohl das Konzept des *Laderoboters für Privatgaragen* als auch der *Reinigungsmulticopter* greifen auf diese Technologie zurück. Entsprechend lassen sich die Reifegradanforderungen für die Technologieentwicklung aus den adressierten Szenarien ableiten. Durch den *Laderoboter* werden zu einem früheren Zeitpunkt Anforderungen an die Technologie gestellt, der maximal geforderte Reifegrad der Technologie wird jedoch durch das Konzept des *Reinigungsmulticopters* definiert. In der Roadmapdarstellung wird die zeitliche Entwicklung des Technologiefelds verdeutlicht, während in der Graphenform (vgl. Abbildung 6.7) die Darstellung von Abhängigkeitsverhältnissen im Vordergrund steht. Die zeitliche Staffelung des Handlungsbedarfs ist in der Roadmapdarstellung deutlich erkennbar. Im Rahmen des nächsten Abschnittes werden die in der Roadmap beschriebenen Aktivitäten zur Weiterentwicklung des Technologiefelds ASR umgesetzt, die Ergebnisse in den TFG zurückgeführt und ihre Auswirkungen auf das Technologiefeld abgeleitet.

### 6.3 Weiterentwicklung des Technologiefelds Automotive Service Robotics

Die Analyse des Technologiefelds ASR zeigt, dass sowohl auf konzeptioneller als auch auf technologischer Ebene Handlungsbedarfe bestehen. Im Rahmen der Technologieentwicklung werden diese Handlungsbedarfe geschlossen und die resultierenden Ergebnisse in die Graphendarstellung zurückgeführt. Zur Schließung der Handlungsbedarfe werden zwei Ansätze verfolgt. Eine Weiterentwicklung strategisch relevanter Technologien und der Aufbau unternehmensinterner

Kompetenzen soll die Realisierbarkeit zukünftiger Applikationen sichern. Durch den Technologiefeldgraphen wird die Technologie *optische Mustererkennung* als relevant identifiziert und entsprechende Anforderungen an den Reifegrad aus den Use Cases abgeleitet. Diese Anforderungen werden im Rahmen von Abschnitt 6.3.1 betrachtet. Ferner wird eine Technologieentwicklung beschrieben, um den Handlungsbedarf zu adressieren.

Die Neuentwicklung von Konzepten adressiert die aktuell bestehenden Bedarfe für Use Cases und Szenarien. Aus dem Technologiefeldgraph ergibt sich der Bedarf nach einem Konzept für das Szenario *Laden in Privatgaragen*, für den Use Case *Fahrzeug automatisch parken* und für die *Sensorreinigung in kritischen Situationen*. Die Entwicklung entsprechender Konzepte, um diesen Handlungsbedarf zu schließen, wird in Abschnitt 6.3.2 beschrieben.

### 6.3.1 Technologieentwicklung

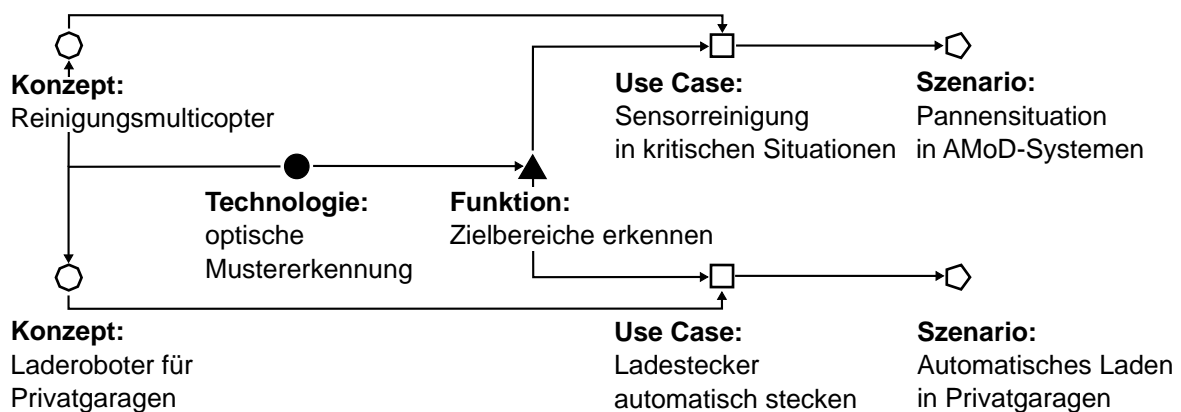
Durch den Technologiefeldgraphen ist ein Handlungsbedarf für die Technologie der *optischen Mustererkennung* identifiziert worden, um die Realisierung zukünftiger Konzepte für das Technologiefeld ASR zu ermöglichen. Im Rahmen der Informationsbeschaffungsphase (vgl. Abschnitt 6.2) wird der unternehmensinterne Reifegrad der Technologie durch die Experten als gering eingeschätzt ( $\mathbf{TRL}_{\text{real}} = 2$ ). Die Technologie besitzt eine kumulierte Relevanz von  $\mathbf{REL}_{\text{kum}} = 80$  und eine reale Relevanz von  $\mathbf{REL}_{\text{real}} = 3$ . Durch einen Vergleich der Werte mit dem Mittelwert der Relevanzen für die Ebene der Technologien  $\overline{\mathbf{REL}} = 16,5$  und  $\overline{\mathbf{REL}}_{\text{real}} = 0,3$  ist erkennbar, dass diese Werte den Mittelwert deutlich überschreiten. Hieraus resultiert in Anlehnung an die Priorisierungslogik (Gleichung A.23) eine sehr hohe Priorität innerhalb des Technologiefelds. Eine entsprechende Weiterentwicklung bzw. Verzögerung hat somit großen Einfluss auf die Entwicklung des gesamten Technologiefelds (vgl. Abschnitt 5.4). Durch den TFG ergibt sich, dass die Anforderungen der Szenarien an den Reifegrad nicht erfüllt werden können und ein entsprechender Handlungsbedarf  $\mathbf{NFA}_{\text{tech|theo}}^{\text{T|max}} = 4$  besteht. Die maximalen Reifegradanforderungen werden durch das Szenario *Pannensituation in AMoD-Systemen* mit  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}} = 6$  definiert.

Zu Beginn der Technologieentwicklungen sind die Grundprinzipien der Technologie in der Literatur beschrieben. Ein Nachweis oder ein Funktionsaufbau sind nicht vorhanden. Um den Anforderungen nach einem Prototyp im Reallabor gerecht zu werden, wird durch die Arbeiten von TORO (2017) [175] und HELBIG (2018) [63] eine entsprechende Technologieentwicklung durchgeführt. Durch die Arbeit von TORO wird ein Algorithmus zur Mustererkennung mit einem kostenoptimierten Kamerasystem vorgestellt. Anhand eines Funktionsmusters für ein Robotersystem erfolgt der Nachweis der Machbarkeit in einer Laborumgebung und die Steigerung des Reifegrads auf  $\mathbf{TRL}_{\text{real}} = 4$ . In Abbildung 6.9 sind die Ergebnisse der Technologieentwicklung am Beispiel einer Ladeschnittstelle für Elektrofahrzeuge dargestellt. Der dargestellte Aufbau zielt auf den Einsatz im Konzept des *Laderoboters für Privatgaragen* ab und wird im weiteren Verlauf des Abschnitts erläutert (vgl. Abschnitt 6.3.2). Durch den Algorithmus von TORO wird in einem mehrstufigen Verfahren auf Grundlage eines Ursprungsbildes (vgl. Abbildung 6.9a) zunächst mithilfe eines Klassifikators der relevante Bildbereich definiert. Anschließend erfolgt mit einem Schwellwertverfahren die Segmentierung des Bildes (vgl. Abbildung 6.9b). Den Abschluss der *optischen Mustererkennung* bildet eine Kreisdetektion (vgl. Abbildung 6.9c) und die Ausgabe der räumlichen Koordinaten des Zielbereichs durch Abgleich der Relativpositionen der Ellipsen.



**Abbildung 6.9:** Mustererkennung am Beispiel der Ladeschnittstelle [175]

Die in der Arbeit von TORO verfolgte Anwendung ist zugeschnitten auf die Erkennung von Kreismustern im Zusammenhang mit der Detektion von Ladeschnittstellen von Elektrofahrzeugen. Die erarbeiteten Ergebnisse lassen sich jedoch auch auf die Erkennung anderer Musterformen übertragen [175]. Aufbauend auf den Ergebnissen entwickelt HELBIG (2018) in seiner Arbeit den Algorithmus weiter und ermöglicht einen Einsatz unter Reallaborbedingungen  $TRL_{\text{real}} = 6$  (vgl. Abschnitt 5.2.1). Die für die Technologieentwicklung relevanten Anforderungen stammen aus dem Szenario *Pannensituation in AMoD-Systemen* und erfordern einen Einsatz der *optischen Mustererkennung* im Außenbereich bei wechselnden Tageslichtsituationen. Der Ansatz wird hierzu auf die Erkennung von 2D-Barcodes adaptiert und in Versuchen experimentell validiert [63].



**Abbildung 6.10:** Auswirkungen der Technologieentwicklung

Durch die Ergebnisse von TORO [175] und HELBIG [63] kann der Reifegrad der Technologie von  $TRL_{\text{real}} = 2$  auf  $TRL_{\text{real}} = 6$  gesteigert und der identifizierte Handlungsbedarf innerhalb des Technologiefeldgraphen geschlossen werden. Die Auswirkungen der Technologieentwicklungen auf die Elemente des TFG sind in Abbildung 6.10 dargestellt. Hierbei sind die Elemente des Graphen herausgegriffen, die direkt oder indirekt in Relation mit der Technologieentwicklung stehen. Erkennbar ist, dass durch die Steigerung des Technologiereifegrads die Handlungsbedarfe auf Technologie- und Funktionsebene geschlossen werden. Eine theoretische Umsetzung der Szenarien ist somit möglich. Der Handlungsbedarf auf den übrigen Ebenen des TFG bleibt jedoch weiterhin bestehen, da die Konzepte des *Laderoboters für Privatgaragen* und des *Reini-*

*gungsmulticopters* weiterhin einen technologischen bzw. monetären Handlungsbedarf aufweisen. Entsprechend bildet die Konzeptentwicklung auf Use Case- und Szenarioebene den nächsten Schritt in der Entwicklung des Technologiefelds, um den realen Handlungsbedarf zu schließen. Die erarbeiteten Ergebnisse bilden hierbei die Ausgangsbasis, da die grundsätzliche Einsatzfähigkeit der Technologie sichergestellt wird.

### 6.3.2 Konzeptentwicklung

Eine Neuentwicklung von drei Konzepten schließt den Handlungsbedarf auf der Use Case- und Szenarioebene. Diese Konzepte werden im Folgenden erläutert. Zunächst wird der Handlungsbedarf beschrieben und die hieraus resultierenden Anforderungen an die Konzeptentwicklung abgeleitet. Im Anschluss werden die Ergebnisse dargestellt.

**Laderoboter für Privatgaragen** Die Entwicklung eines *Laderoboters für Privatgaragen* motiviert sich aus dem Szenario *Automatisches Laden in Privatgaragen*. In dem Szenario wird eine automatisierte, konduktive Lademöglichkeit von Elektrofahrzeugen in der Privatgarage des Endkunden gefordert. Ziel ist es, den Kunden mit einem kostengünstigen Produkt vom manuellen Steckvorgang zu entlasten. Durch den Steckbrief ist ein Reifegrad von  $TRL_{\text{real}} = 4$  gefordert, da eine erste Machbarkeitsuntersuchung unter Laborbedingungen für ein kostengünstiges Ladesystem durchgeführt werden soll. Das Konzept E-SMARTCONNECT kann zwar die technologischen Anforderungen erfüllen, jedoch können die Kostenanforderungen nicht erreicht werden, sodass ein monetärer Handlungsbedarf resultiert. Durch ein neu entwickeltes Konzept sollen diese Kostenziele erreicht werden. Im Gegensatz zum Szenario *Automatisches Parken und Laden im Betriebshof* ist durch das Szenario definiert, dass lediglich eine eingeschränkte Anzahl an Fahrzeugen bedient werden soll. Somit können die Anforderungen an die Konzeptentwicklung eingeschränkt werden. Beispielsweise wird ein reduzierter Arbeitsraum benötigt, da nur bestimmte Posen der Ladedose im Raum erreicht werden müssen.

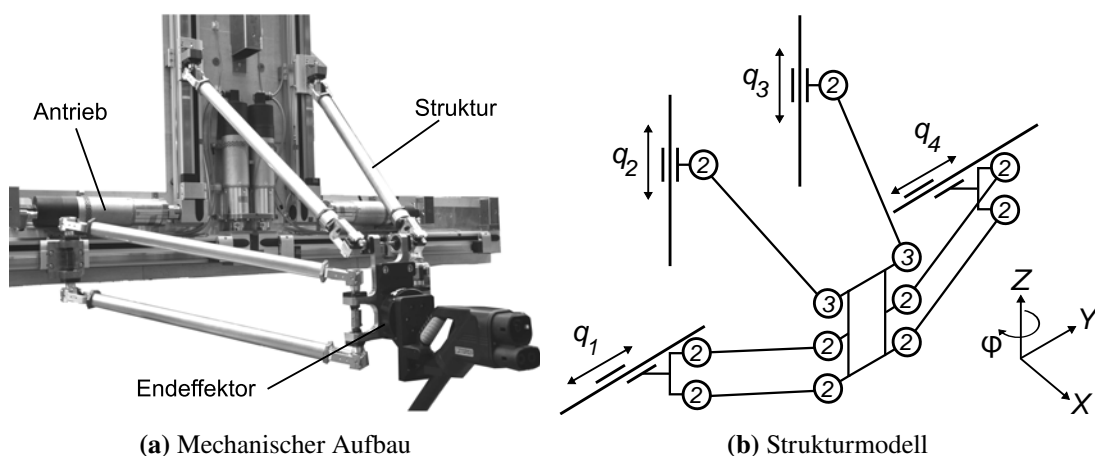
In Abbildung 6.11 ist das Ergebnis der Konzeptentwicklung dargestellt. Hierbei handelt es sich um einen isolierten Automotive Service Roboter (vgl. Abschnitt 2.3), der als Wandinstallation in der Privatgarage montiert wird. Mit dem Ziel die Kostenanforderungen des Szenarios zu erfüllen, baut das Konzept auf einer parallelkinematischen Roboterstruktur, der sogenannten KANUK-Struktur von Luc Rolland [132], auf. Die Vorteile einer parallelkinematischen Roboterstruktur liegen in den geringen bewegten Massen, der Verwendung identischer Antriebskomponenten und der aufgabenspezifischen Gestaltung der kinematischen Struktur.

Durch die Kinematik wird eine translatorische Bewegung in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung sowie eine rotatorische Bewegung  $\varphi$  um  $z$  ermöglicht. Die Struktur besitzt einen Freiheitsgrad von  $F = 4$ . Dies entspricht dem benötigten Freiheitsgrad, um die Abweichungen des Parkvorgangs in der Garage zu kompensieren. Die verbleibenden rotatorischen Freiheiten  $\vartheta$  und  $\psi$  sind fahrzeugspezifische Größen und können fest eingerichtet werden, da sie nicht durch den Parkvorgang beeinflusst werden. Der resultierende translatorische Arbeitsraum besitzt eine Größe von  $250 \times 300 \times 15$  mm und ist auf die zu erwartenden Positionsabweichungen beim Parken in der Privatgarage ausgerichtet. [192]

Die Struktur besteht aus vier kinematischen Ketten und vier identischen Linearachsen mit Riemenantrieb  $q_1, q_2, q_3$  und  $q_4$  zur Bewegungserzeugung. In Abbildung 6.11b sind das Strukturmodell und die realisierten Freiheiten abgebildet. Zwei der kinematischen Ketten sind als horizontale Parallelogramme ausgeführt, jeweils bestehend aus vier Gelenken mit einer Gelenkfreiheit von  $f = 2$ . Somit sind die Translationen von den Rotationen entkoppelt [132]. Die anderen zwei Ketten bestehen aus einem Kardangelenk ( $f = 2$ ) und einem Kugelgelenk ( $f = 3$ ) in vertikaler Anordnung und realisieren die Rotation des Endeffektors. Der rotatorische Arbeitsraum ist durch die Struktur auf  $\varphi = \pm 8^\circ$  begrenzt. [192]

Mit der KANUK-Struktur wird der Steckvorgang durch die kraftoptimierte Übersetzung des räumlichen Getriebes unterstützt. In der Position, in der ein Steckvorgang erfolgt, befindet sich die Kinematik in einer Kniehebelstellung und die benötigte Steckkraft von  $F_{\text{Steck}} = 100 \text{ N}$  kann folglich durch eine im Vergleich zu seriellen Strukturen geringe Antriebsleistung realisiert werden. Gleichzeitig ist durch die Kinematik eine geringe Bauhöhe in  $x$ -Richtung im eingefahrenen Zustand realisierbar und der Platzbedarf kann bei einer Wandmontage in der Garage minimiert werden. Am Endeffektor der Struktur ist der Ladestecker fest angebunden und auf die Orientierung der Ladedose im Fahrzeug eingerichtet. Am Endeffektor befindet sich zudem eine Kamera zur Erkennung der Ladedosenposition, um die Parktoleranzen zu kompensieren. Hier wird die Technologie der *optischen Mustererkennung* eingesetzt, um die standardisierte Innenkontur der Ladedose zu ermitteln und die Zielpose für die Trajektorienberechnung zu bestimmen (vgl. Abschnitt 6.3.1).

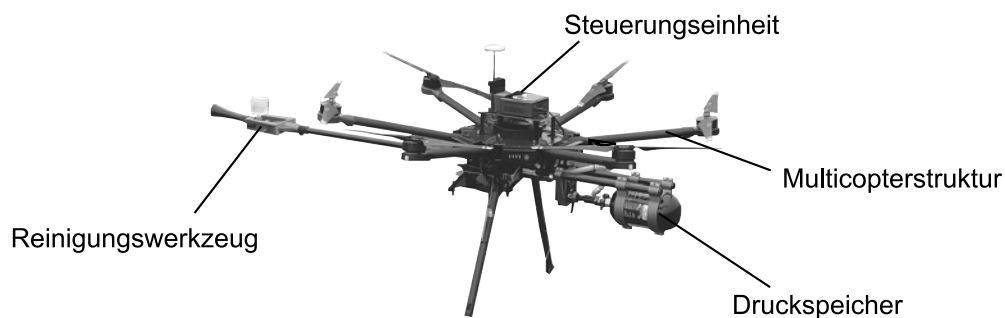
Um die Konzeptentwicklung im Rahmen der monetären Anforderungen des Szenarios zu realisieren, werden die Potenziale der parallelkinematischen Struktur genutzt [50, 202]. Zum einen kann durch die Verfolgung einer Gleichteilstrategie für die Antriebskomponenten und Gelenke eine Kostenersparnis erreicht werden. Zum anderen können durch die aufgabenspezifische Auslegung der Struktur und die geringen bewegten Massen die Antriebsleistungen minimiert und eine weitere Kostenreduktion erreicht werden. Als Ergebnis der Konzeptentwicklung wird ein Funktionsmuster in einer Laborumgebung realisiert und die Anwendbarkeit des Konzepts nachgewiesen. Somit werden die durch das Szenario gesetzten Anforderungen nach einem Reifegrad von  $\text{TRL}_{\text{gef}} = 4$  und einer Reduzierung der Kosten erfüllt. Gleichmaßen erfolgt die Validierung der Technologieentwicklung zur *optischen Mustererkennung* im Rahmen des Konzepts.



**Abbildung 6.11:** Funktionsmuster eines Laderoboters für Privatgaragen

**Reinigungsmulticopter** Zur Lösung des Handlungsbedarfs im Use Case *Sensorreinigung in kritischen Situationen* wird das Konzept eines *Reinigungsmulticopters* verfolgt. Durch das Szenario *Pannensituation in AMoD-Systemen* wird eine Lösung für das Problem der Sensorverschmutzung von Fahrzeugen mit automatisierten Fahrfunktionen in Mobility-on-Demand-Systemen gefordert. Erste Lösungsansätze basieren auf fahrzeugintegrierten Reinigungsmöglichkeiten, die jedoch eingeschränkte Wirksamkeit bieten [59, 82, 179]. Eine zu starke Verschmutzung der relevanten Sensorik kann zu einem Liegenbleiben von Fahrzeugen der Automatisierungsstufe 4 und 5 führen (vgl. Abschnitt 2.1). In automatisierten Mobilitätssystemen bedeutet dies, dass die Sensorik über einen externen Eingriff gereinigt werden muss, um die Fahrbereitschaft wiederherzustellen. Der Einsatz einer Automatisierungslösung im Sinne von ASR bietet das Potenzial, einen effizienten Betrieb des Mobilitätssystems zu gewährleisten. Als relevanter Use Case wird die *Sensorreinigung in kritischen Situationen* definiert.

Die Besonderheit des Szenarios liegt in der Dezentralität des Reinigungsvorgangs. Da eine Verschmutzung der Sensorik innerhalb des Betriebsgebiets an einem beliebigen Standort erfolgen kann, wird ein standortflexibles Lösungskonzept benötigt. Somit muss das System in der Lage sein, autark zu agieren und einen möglichst großen Betriebsbereich abzudecken. Durch das Szenario wird ein maximaler Technologiereifegrad von  $\text{TRL}_{\text{gef}} = 6$  gefordert. Da insbesondere die Erprobung unter realen Bedingungen für die Einsatzbereitschaft in zukünftigen Mobilitätssystemen ausschlaggebend ist, gehen die Anforderungen dieses Szenarios über die Erprobung unter Laborbedingungen hinaus. Der Handlungsbedarf auf Szenarioebene lässt sich durch den TFG auf die Technologie *optische Mustererkennung* herunterbrechen und die Ergebnisse der Technologieentwicklung (vgl. Abschnitt 6.3.1) fließen in die Konzeptentwicklung ein. Das im Rahmen der Arbeit von HELBIG [63, 191] erarbeitete Ergebnis der Konzeptentwicklung ist in Abbildung 6.12 dargestellt.

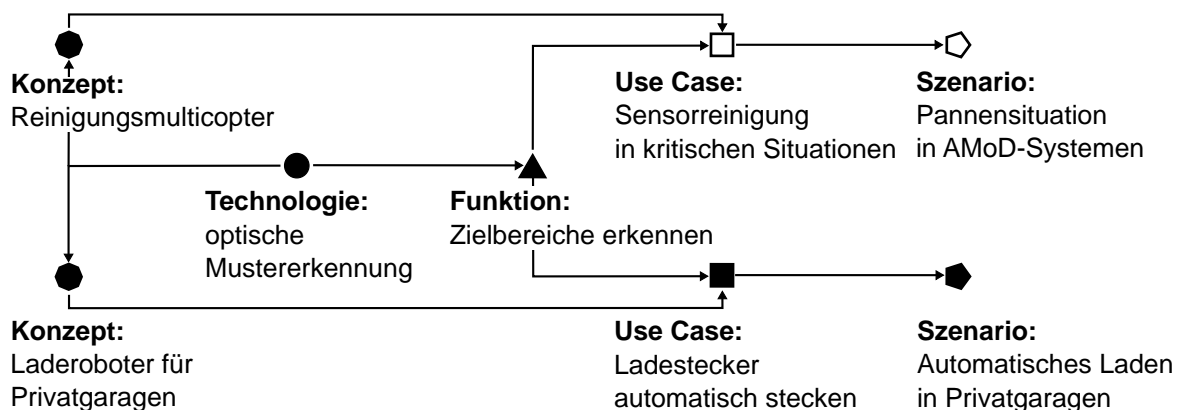


**Abbildung 6.12:** Funktionsmuster für einen Reinigungsmulticopter

Die Problematik der dezentralen Reinigung wird mit einer Konzeptentwicklung auf Grundlage eines Multicopters vom Typ DJI MATRICE 600 [171] gelöst. Dieses System kann über universelle Schnittstellen für Soft- und Hardware mit einer Vielzahl von Werkzeugen ausgestattet werden und erfüllt die Anforderungen des Szenarios nach einer hohen Standortflexibilität. Um die Funktion *Sensor reinigen* zu realisieren, wird ein Druckluftreinigungswerkzeug verwendet, das durch den Venturi-Effekt eine Reinigungsflüssigkeit auf die Sensorik aufbringt. Ein Drucktank mit entsprechender Ventiltechnik stellt hierbei die Druckluftversorgung sicher. Das Gesamtsystem besitzt eine Gesamtmasse von  $m = 13 \text{ kg}$  und ist in der Lage, eine Positionsabweichung durch die resultierenden Rückstoßkräfte während des Reinigungsvorgangs zu kompensieren. Die Grobpositionierung relativ zum Fahrzeug erfolgt mithilfe einer IMU und GPS. Im finalen Einsatzfall

wird über den Flottenbetreiber ein bedarfsorientierter Einsatz des Systems realisiert. Über eine Kamera und die Technologie der *optischen Mustererkennung* (vgl. Abschnitt 6.3.1) wird ferner eine Feinpositionierung relativ zum Reinigungsobjekt vorgenommen. Hierzu ist die Sensorik des Fahrzeugs mit entsprechenden Markierungen bestückt. Grundsätzlich setzt das Szenario einen Einsatz im öffentlichen Raum voraus und fordert die Funktion der *Personensicherheit im öffentlichen Raum*. Um jedoch die Realisierbarkeit des Konzepts im ersten Schritt zu ermöglichen, wird diese Funktion zunächst vernachlässigt und der Fokus auf einen Nachweis der technischen Machbarkeit des Konzepts gelegt. Die Personensicherheit wird in der Reallaborumgebung nicht berücksichtigt. Dies begründet sich unter anderem in der volatilen Gesetzeslage für Multicopter und deren Anwendung [14, 87]. In der aktuellen Ausrichtung ist die aktuelle Gesetzeslage nicht im Stande, eine Umsetzung des Konzepts im Realbetrieb zu ermöglichen. Da die Umsetzung des Szenarios als fertiges Produkt  $TRL = 9$  für einen Zeithorizont von 2025+ geplant ist, wird von einer geänderten Gesetzeslage ausgegangen. Die Realisierung der Personensicherheit nach heutigen Standards ist nicht zielführend. [63, 191]

Im Rahmen der Entwicklung wird zunächst die Funktionalität der Konzeptbeschreibung in einer Simulation nachgewiesen ( $TRL_{\text{real}} = 3$ ). Aufbauend auf den Ergebnissen werden reale Flugversuche durchgeführt und die Machbarkeit zunächst im Laboraufbau ( $TRL_{\text{real}} = 4$ ) und später im realen Umfeld nachgewiesen ( $TRL_{\text{real}} = 6$ ). Mit den Ergebnissen wird ein Konzept bereitgestellt, das den Use Case *Sensorreinigung in kritischen Situationen* im Szenario *Pannensituation in AMoD-Systemen* umsetzt und auf den Ergebnissen der Technologieentwicklung aufbaut. Somit kann der Handlungsbedarf geschlossen werden, sowie die Technologie der *optischen Mustererkennung* aufgegriffen und in einem realen Umfeld erprobt werden.



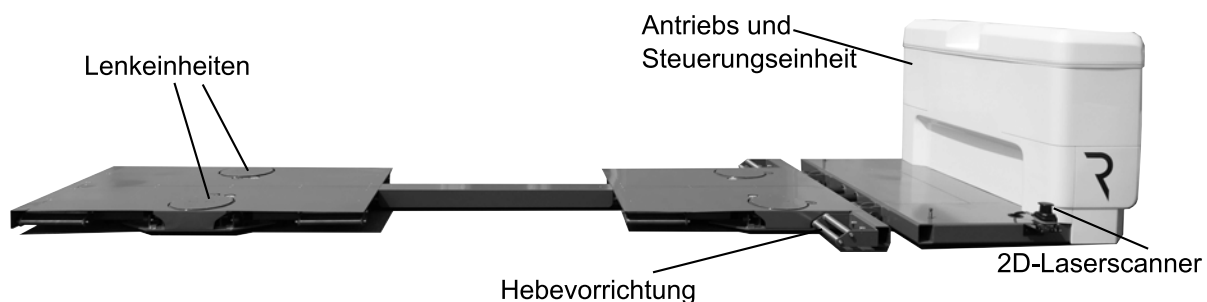
**Abbildung 6.13:** Auswirkung der Konzeptentwicklung

Die Auswirkungen der Konzeptentwicklung sind in Abbildung 6.13 dargestellt. Durch die Entwicklung des *Reinigungsmulticopters* kann der Handlungsbedarf auf der Konzeptebene geschlossen werden. Auf der Use Case- und Szenarioebene besteht jedoch weiterhin ein Handlungsbedarf. Dies resultiert aus der Tatsache, dass eine Teilfunktion im Rahmen der Entwicklung zunächst vernachlässigt wird und so der geforderte Reifegrad des Szenarios nicht durch alle Funktionen erfüllt wird. Eine detaillierte Erläuterung erfolgt im Rahmen von Abschnitt 6.4. Durch den *Laderoboter für Privatgaragen* werden hingegen die Defizite auf Konzept-, Use Case- und Szenarioebene vollständig bedient und es verbleibt kein Handlungsbedarf.



**Parkroboter** Die dritte Konzeptentwicklung adressiert den bestehenden Handlungsbedarf im Szenario *Automatisches Parken und Laden im Betriebshof*, im Speziellen für den Use Case *Fahrzeug automatisch parken*. Die automatisierte Parkfunktion stellt eine Schlüsseltechnologie für das Themenfeld ASR dar. Viele der Applikationen setzen eine teilweise Automatisierung des Parkvorgangs voraus. Dies zeigt sich durch die hohe Priorität des Use Case. Der aktuelle Entwicklungsverlauf relevanter Technologien erfüllt jedoch nicht die Anforderungen des Szenarios. Hieraus resultiert, dass das Konzept *automatisiertes Valet-Parken durch Fahrzeug* nicht in der geforderten Reife und Marktdurchdringung zur Verfügung steht. Entsprechend ist das Szenario nicht realisierbar. Um kurzfristig und mit dem heutigen Stand der Technik eine Realisierung zu ermöglichen, wird die Entwicklung eines Alternativkonzepts verfolgt. Somit kann sichergestellt werden, dass die Szenarien, die eine automatisierte Parkfunktion voraussetzen, frühzeitig umgesetzt werden können.

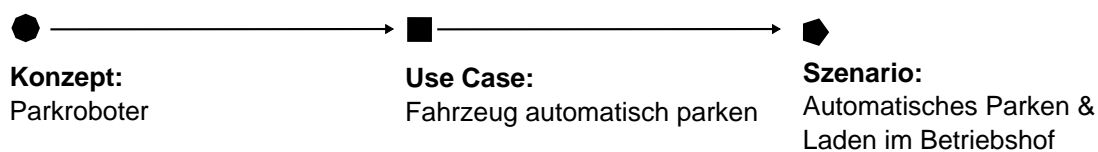
Durch das Szenario *Automatisches Parken und Laden im Betriebshof* wird ein Anwendungsfall beschrieben, in dem elektrifizierte Flottenfahrzeuge auf einem Betriebshof automatisch geparkt und geladen werden sollen. Das Ziel ist es, den nächtlichen Ladevorgang der Fahrzeuge zu automatisieren. Durch die Möglichkeit des automatisierten Parkens soll die Auslastung von Schnellladestationen gesteigert werden, indem Fahrzeuge auf einem Betriebshof bedarfsgesteuert zur Ladestation gefahren werden. Somit entfällt die Notwendigkeit einer Ladestation an jedem Stellplatz und der Ladevorgang kann an einer geringen Anzahl von Schnellladestationen zentralisiert werden. Hierbei handelt es sich um einen abgegrenzten Bereich, in dem die Parkfunktion realisiert werden soll. Bei den zu parkenden Fahrzeugen handelt es sich um Fahrzeuge identischen Typs, die aktuell nicht über eine automatisierte Parkfunktion verfügen. Zur Realisierung des Use Case *Ladestecker automatisch stecken* ist bereits das Konzept E-SMARTCONNECT mit einem ausreichenden Reifegrad von  $TRL_{\text{real}} = 7$  vorhanden. Um die automatisierte Parkfunktion zu realisieren, wird das Konzept eines *Parkroboters* verfolgt. Bei diesem Konzept handelt es sich um eine Brückentechnologie, die mit einer zunehmenden Marktdurchdringung von automatisierten Fahrfunktionen substituiert werden kann.



**Abbildung 6.14:** Funktionsmuster für einen Parkroboter

Das Ergebnis der Konzeptentwicklung für einen Parkroboter ist in Abbildung 6.14 dargestellt. Hierbei handelt es sich um einen mobilen Roboter, der in der Lage ist, Fahrzeuge automatisch anzuheben, innerhalb eines definierten Bereichs zu transportieren und an einem definierten Zielort abzusetzen. Hierzu lokalisiert sich das System mithilfe von 2D-Laserscannern innerhalb einer zuvor erstellten Karte des Arbeitsbereichs. Die Fahrzeugaufnahme erfolgt über zwei separate Schwenkeinheiten, die jeweils eine Achse des Fahrzeugs über die Räder anheben. Die Ansteuerung erfolgt hydraulisch, wodurch eine Traglast von  $m = 4 \text{ t}$  Fahrzeugmasse erreicht wird.

Da durch die Anforderungen des Szenarios ausschließlich die Aufnahme von Fahrzeugen eines Typs gefordert ist, ist die Hebevorrichtung auf einen definierten Radstand von  $l = 3640$  mm ausgelegt. Um eine maximale Flächennutzung zu erzielen, sollen die Fahrzeuge möglichst eng geparkt werden. Aus diesem Grund wird der Bauraum unterhalb des zu parkenden Fahrzeugs durch das System genutzt. Die geringe Bauhöhe des Systems von  $z = 166$  mm ermöglicht eine vor- sowie rückwärtig Aufnahme des Fahrzeugs. Die Antriebsleistung des Systems beträgt  $P = 8$  kW bei einer Betriebsspannung von  $U = 24$  V. Das verwendete Batteriesystem ermöglicht einen autarken Betrieb von  $t = 8$  h. Der *Parkroboter* ist in der Lage mit einer Beschleunigung von  $a = 0,5$  m/s<sup>2</sup> eine maximale Geschwindigkeit von  $v = 1,7$  m/s zu erreichen. Diese Geschwindigkeit basiert auf den Mindestanforderungen des Szenarios, um ein nächtliches Umparken der Fahrzeuge zu ermöglichen. [193]



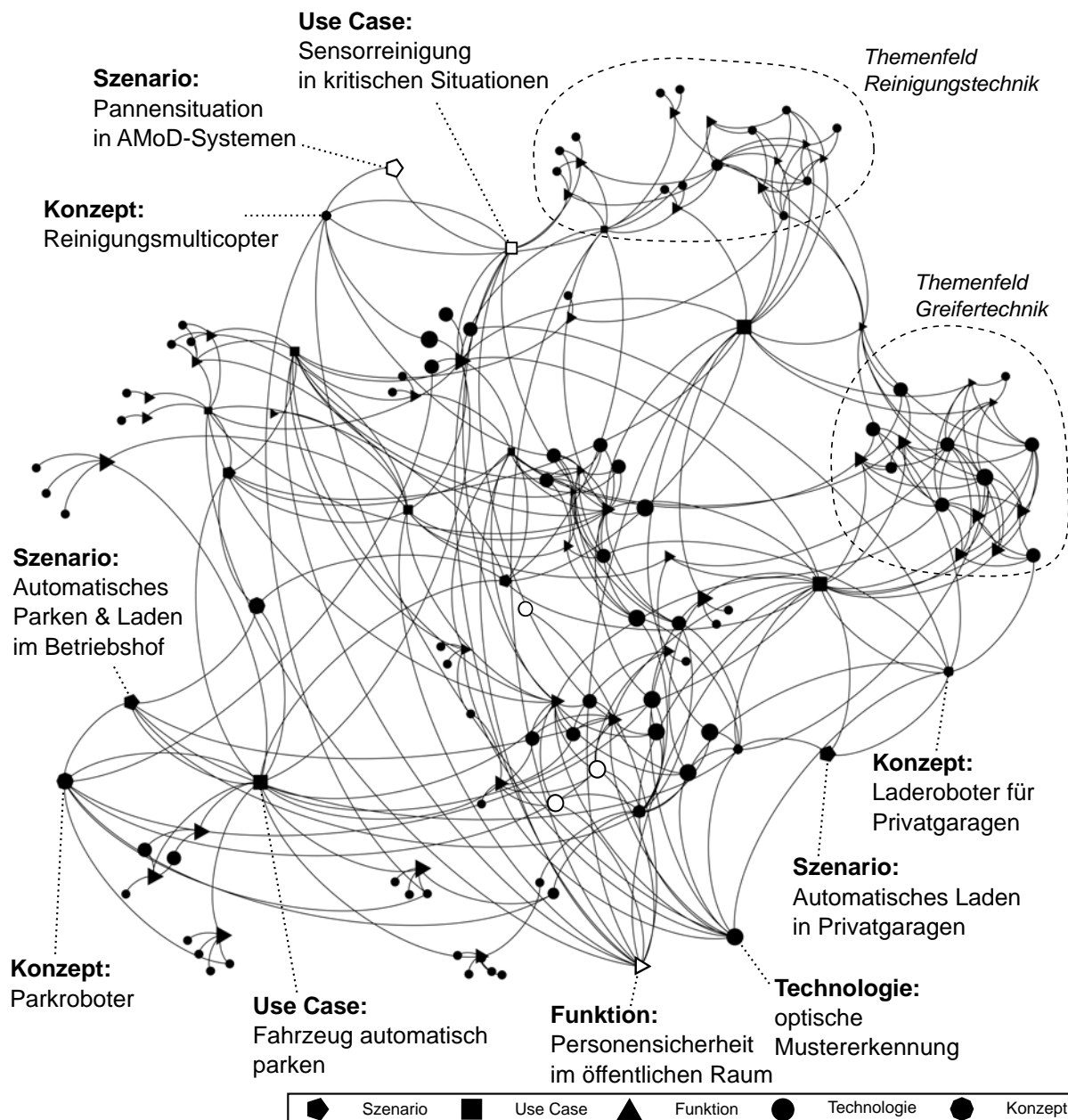
**Abbildung 6.15:** Auswirkung der Parkroboterentwicklung

Durch die Konzeptentwicklung wird ein System realisiert, das zunächst innerhalb einer Laborumgebung erprobt ( $\text{TRL}_{\text{real}} = 4$ ) und dessen Funktionalität in einem Reallabor ( $\text{TRL}_{\text{real}} = 6$ ) nachgewiesen ist. Somit werden die Anforderungen des Szenarios *Automatisches Parken und Laden im Betriebshof* erfüllt und der Handlungsbedarf geschlossen. Die Auswirkungen der Konzeptentwicklung sind in Abbildung 6.15 dargestellt. Der *Parkroboter* schließt das bestehende Defizit, sowohl auf Use Case- als auch Szenarioebene. Entsprechend sind die im Rahmen der Roadmapableitung (vgl. Abschnitt 6.2) definierten Handlungsstränge abgearbeitet und die Ergebnisse können gesammelt in den TFG zurückgeführt werden.

## 6.4 Rückführung der Ergebnisse

Nach Abschluss der Technologie- und Konzeptentwicklung zeigt eine Rückführung der Ergebnisse in den Technologiefeldgraphen die Weiterentwicklung des Technologiefelds. Die Rückführung deckt auf, welche Handlungsbedarfe im Übergang des Technologiefelds von einem ersten Zeitschritt  $t_k$  zu einem zweiten Zeitschritt  $t_{k+1}$  durch die Weiterentwicklungen geschlossen und welche neuen Knotenelemente ergänzt werden. In Abbildung 6.16 ist die Rückführung der Entwicklungsergebnisse in den TFG dargestellt. Erkennbar ist, dass der Graph in seinem makroskopischen Aufbau dem ursprünglichen TFG ähnelt und keine neuen Hubs oder Authorities entstanden sind (vgl. Abschnitt 4.2.1). Entsprechend ergibt die Anwendung kräftebasierter Layoutverfahren eine nahezu identische Repräsentation des Graphen. In Abbildung 6.16 ist erkennbar, dass ein Großteil des Handlungsbedarfs für das Technologiefeld ASR durch die Technologie- und Konzeptentwicklung geschlossen wird. Für einzelne Knotenelemente können die szenarioseitigen Anforderungen dennoch nicht erfüllt werden.

Durch das Konzept des *Parkroboters* kann der Handlungsbedarf  $\text{NFA}_{\text{tech|real}}^{\text{S}} = 3$  für das Szenario *Automatisches Parken und Laden im Betriebshof* geschlossen werden. Das Konzept adressiert den Use Case *Fahrzeug automatisch parken*. Entsprechend ist auch der Handlungsbedarf für das



**Abbildung 6.16:** Weiterentwicklung des Technologiefelds Automotive Service Robotics

Konzept des *automatisierten Valet-Parkens* durch *Fahrzeug* adressiert und das Szenario kann als realisierbar betrachtet werden. In der ersten Betrachtung des Technologiefelds bestand für das Szenario des *automatischen Ladens in Privatgaragen* ein monetärer Handlungsbedarf, der sich entsprechend auch auf das Konzept E-SMARTCONNECT niedergeschlagen hat. Im Rahmen der Konzeptentwicklung des *Laderoboters für Privatgaragen* wird der Handlungsbedarf für das Szenario durch eine Neuentwicklung bedient. Entsprechend entfällt in der nächsten Entwicklungsstufe des Technologiefeldgraphen auch der Handlungsbedarf für das Konzept E-SMARTCONNECT. Grundvoraussetzung für die Konzeptentwicklung ist die Technologieentwicklung der *optischen Mustererkennung*. Durch die Fortschritte auf Ebene der Technologien kann die Realisierung der

Konzepte des *Reinigungsmulticopters* und des *Laderoboters für Privatgaragen* sichergestellt werden. Der entsprechende Handlungsbedarf innerhalb des TFG kann somit bedient werden und die Grundlage für weitere Konzeptentwicklungen wird gelegt.

Anwendung findet die Technologie unter anderem im Konzept des *Reinigungsmulticopters*, welcher für die Umsetzung des Use Case *Sensorreinigung in kritischen Situationen* im Szenario *Pannensituation in AMoD-System* entwickelt wurde. Durch die in Abschnitt 6.3.2 beschriebenen Entwicklungen wird dem TFG ein Konzept zur Adressierung des realen Handlungsbedarfs  $NFA_{\text{tech|real}}^S$  für das Szenario hinzugefügt. Jedoch wird in der Konzeptentwicklung die Funktion der *Personensicherheit im öffentlichen Raum* nicht berücksichtigt und nicht realisiert. Entsprechend besteht weiterhin ein theoretischer Handlungsbedarf  $NFA_{\text{tech|theo}}^S$  für das Szenario, da die Technologiereife für die Funktion *Personensicherheit im öffentlichen Raum* im Rahmen der Konzeptentwicklung nicht gesteigert wird. Der neue Handlungsbedarf schlägt sich ebenfalls auf den adjazenten Use Case und schlussendlich auf die relevanten Technologien nieder.

Bei der Rückführung ist zu beachten, dass lediglich die erfolgte Technologie- und Konzeptentwicklung berücksichtigt wird. Neben dieser technologieorientierten Entwicklung des TFG verändert sich im realen Umfeld auch die Anforderungsseite und neue Szenarien und Use Cases fließen in den Graphen ein. Entsprechend verschieben sich in der realen Anwendung die Prioritäten und Handlungsbedarfe. Dies ist durch die beschriebene Anwendung des Methodenansatzes nicht abgebildet. Eine Bewertung der Anwendbarkeit ist jedoch auch bei diesem eingeschränkten Einsatz möglich.

## 6.5 Zusammenfassung

Die prototypische Umsetzung des Methodenansatzes liefert ein Werkzeug zur exemplarischen Anwendung und Validierung. Durch die in dieser Arbeit verfolgte Kombination von VISUAL BASIC, MATLAB und GEPHI ergibt sich ein integrativer Softwareansatz, der die Verarbeitung und Visualisierung eines Technologiefeldgraphen ermöglicht. Über die in dieser Arbeit gewählten Ansätze hinaus ist jedoch auch die Umsetzung durch andere Softwareelemente möglich, der vorgestellte Ansatz dient lediglich der grundlegenden Validierung der Methodik.

Auf Grundlage von Expertenworkshops lässt sich das Technologiefeld ASR beschreiben. Die Dokumentation von Steckbriefen ermöglicht die Überführung der Informationen in einen Technologiefeldgraphen unter Anwendung des entwickelten Softwareansatzes. Die Analyse des Technologiefelds ASR ergibt einen technologischen Handlungsbedarf für die optische Mustererkennung sowie einen konzeptionellen Handlungsbedarf für die Szenarien des automatischen Parkens und Ladens im Betriebshof, dem automatischen Laden in Privatgaragen und der Pannensituation in AMoD. Durch den Methodenansatz können Anforderungen an die Technologie- und Konzeptentwicklung abgeleitet werden und eine Roadmap zur Bearbeitung des Handlungsbedarfs bestimmt werden. Die Rückführung der Ergebnisse in den Technologiefeldgraphen zeigt, dass die Fokussierung auf den identifizierten Handlungsbedarf zu einer maßgeblichen Weiterentwicklung des Technologiefelds führt.



## 7 Diskussion der Ergebnisse

Zur Validierung des Methodenansatzes wird auf Grundlage der in Kapitel 6 beschriebenen Weiterentwicklungen des Technologiefelds in diesem Kapitel die Anwendbarkeit und der resultierende Mehrwert des Methodenansatzes herausgestellt. Hierzu erfolgt ein Abgleich der Ergebnisse mit den Zielstellungen der Methodenentwicklung aus Abschnitt 3.6. Weiterhin wird der Mehrwert des Methodenansatzes herausgestellt, indem die Herangehensweise mit den klassischen Methoden der strategischen Technologieplanung (vgl. Abschnitt 3.4) verglichen wird. Ferner werden in Abschnitt 7.3 die Einsatzbereiche des Ansatzes abgegrenzt. Um die praktische Nutzung für Methodenanwender zu unterstützen, werden im Rahmen von Abschnitt 7.4 zudem die notwendigen Schritte für eine Adaption des Methodenansatzes auf weitere Technologiefelder beschrieben und die Anwendbarkeit anhand von zwei weiteren Technologiefeldern exemplarisch dargestellt.

### 7.1 Anwendbarkeit

Eine Zielstellung der Methodenentwicklung ist es, die gegenseitige Abhängigkeit von Technologieprojekten in die Priorisierung einzubeziehen. Durch die Abbildungen des Technologiefelds ASR in einen Graphen werden die Interdependenzen zwischen den Elementen beschrieben. Die ebenenspezifische Definition der Kanten im Rahmen des Methodenansatzes stellt sicher, dass die Übersichtlichkeit gewahrt bleibt. Gleichzeitig erfolgt durch die Repräsentation des Graphen und die Anwendung kräftebasierter Layoutverfahren eine gesamtheitliche Analyse des Technologiefelds. Ferner werden die knotenindividuellen Abhängigkeiten und Relevanzen semi-quantitativ dargestellt und Knotenelemente im Sinne einer übergeordneten Unternehmensstrategie priorisiert. Weiterhin soll der Methodenansatz in der Lage sein, sowohl Technology-Push- als auch Market-Pull-Ansätze auf die Wechselwirkungsanalyse abzubilden. Durch die Möglichkeit den Technologiefeldgraphen zu jedem Zeitpunkt um neue Szenarien und Use Cases zu erweitern, wird ein Einbezug von Market-Pull-Ansätzen ermöglicht. Hierbei können die neu hinzugefügten Knotenelemente verknüpft und die Auswirkungen auf die unteren Ebenen der Technologien und Konzepte abgeschätzt werden. Folglich wird eine Aussage darüber getroffen, welche Auswirkungen das Hinzufügen von neuen Szenarien auf die Konzept- und Technologieentwicklungen hat. Es wird abgeschätzt, ob für die Realisierung der neuen Szenarien eine Technologieentwicklung nötig ist oder der Bedarf mit bestehenden Ressourcen gedeckt werden kann. Gleichmaßen können neue Technologien und Konzepte in den TFG integriert und die entstehenden Potenziale für die Realisierung von bestehenden Szenarien untersucht werden. Dies ermöglicht eine technologiegetriebene Entwicklung von Innovationen am Markt. Im Rahmen der exemplarischen Methodenanwendung wird ein Market-Pull-Ansatz verfolgt, in dem aus den Marktbedarfen, dargestellt als Szenarien, die Anforderungen für die Technologie- und Konzeptentwicklung abgeleitet werden.

Ein weiteres Ziel des Methodenansatzes ist es, die Wechselwirkungsanalyse auf die Berücksichtigung von unterschiedlichen Technologiereifegraden zu adaptieren. Da der Methodenansatz und

**Tabelle 7.1:** Bewertung der Anwendbarkeit des Methodenansatzes

<b>Zielstellung</b>	<b>Erkenntnisse aus der Anwendung</b>
Einbeziehen von Abhängigkeiten der Technologieprojekte in die Priorisierung	Graphenstruktur des Ansatzes ermöglicht Relevanz- und Abhängigkeitsabschätzung
Abbilden von Technology-Push/Market-Pull auf die Wechselwirkungsanalyse	Integration neuer Knotenelemente ermöglicht eine Folgenabschätzung/Sensitivitätsanalyse
Adaption der Wechselwirkungsanalyse zur Berücksichtigung von Technologiereife	Attributierung der Knotenelemente ermöglicht die Bewertung technologischer/monetärer Kennwerte
Abbilden dynamischer Änderungsprozesse durch Revision der Technologieroadmap	Dynamische Graphenstruktur ermöglicht zyklische Überarbeitung des TFG und Roadmapanpassung
Adaption der Wechselwirkungsanalyse auf die Dimensionen des Roadmappings	Relationsmodell des Graphen ermöglicht strukturierten Aufbau und intuitive Roadmaperstellung

die Struktur der Technologiefeldgraphen auf dem Property-Graphen-Konzept aufbauen (vgl. Abschnitt 4.3), besteht die Möglichkeit verschiedenste Informationen auf die Knotenelemente abzubilden. So erfolgt der Abgleich von Technologiereifegraden und Kosten und ein entsprechender Handlungsbedarf wird abgeleitet. Im Rahmen der Beispielanwendung werden die Reifegradanforderungen für die Technologie- und Konzeptentwicklung definiert und die Anwendbarkeit nachgewiesen.

Die Abbildung dynamischer Änderungsprozesse durch die Revision der Technologieroadmap ist ebenfalls Bestandteil der Zielstellung. Durch den Methodenansatz wird eine dynamische Bestimmung des Handlungsbedarfs und der Priorisierung von Technologiepotenzialen ermöglicht. Entsprechend können Änderungen technologischer, monetärer oder zeitlicher Parameter der Knotenelemente auf Seiten der Szenarien und Technologien in den Technologiefeldgraphen eingepflegt und Auswirkungen bestimmt werden. Eine Anpassung der Roadmap kann auf Grundlage des aktualisierten TFG erfolgen. Die enge Koppelung von TFG und Roadmap ermöglicht ferner eine Folgeabschätzung für verschiedene Technologiestrategien. Die Wechselwirkungsanalyse auf die Dimensionen des Technologieroadmappings zu adaptieren, um komplexe Abhängigkeiten zu ermitteln, ist ebenfalls Teil der Zielstellung dieser Arbeit.

Durch den Methodenansatz werden Technologiefelder in interdependente Ebenen unterteilt, die in ihrem Zusammenspiel marktseitige Anforderungen mit technologischen Potenzialen verknüpfen. Insbesondere die Ebene der Funktionen sorgt im TFG für eine systematische Zuordnung. Das Technologiefeld ASR kann durch die Ebenen des Graphen detailliert beschrieben werden und die hierarchische Struktur des Graphen unterstützt die Überführung in eine Technologieroadmap. In der Anwendung zeigt sich, dass sich die Handlungsbedarfe des Graphen in eine Roadmapdarstellung überführen lassen. Dies wird insbesondere für die Abhängigkeiten der Use Case- und Technologieebene deutlich. Die Definition einer Technologieroadmap umfasst jedoch immer auch eine Technologieauswahl und hat Auswirkung auf die Konzept- und Produktentwicklung.

In Tabelle 7.1 ist eine Gegenüberstellung der Zielstellungen dieser Arbeit mit abgeleiteten Erkenntnissen aus der Anwendung des Methodenansatzes für ASR dargestellt. Die Tabelle fasst die zuvor beschriebenen Erkenntnisse zur Anwendbarkeit des Methodenansatzes zusammen.

## 7.2 Mehrwert

Der Mehrwert des Methodenansatzes wird herausgestellt, indem das entwickelte Vorgehen den bestehenden Ansätzen der strategischen Technologieplanung gegenübergestellt und die Stärken des eigenen Ansatzes untersucht werden. Weiterhin wird die Bewertung anhand konkreter Beispiele aus der Anwendung auf das Technologiefeld ASR belegt. Auf Grundlage des identifizierten Mehrwerts erfolgt zudem eine Abgrenzung.

Durch die *Bibliometrie*, also die bibliometrische Häufigkeits- und Verflechtungsanalyse, können die Zusammenhänge und Interdependenzen innerhalb eines Themenfelds auf Grundlage einer Zitationsanalyse identifiziert werden. Hierbei ist es möglich, relevante Akteure und Themenschwerpunkte zu identifizieren. Technologie- und Anwendungsfelder können jedoch nur in separaten Analysen betrachtet werden. Gegenüber der Bibliometrie bietet der Methodenansatz des Technologiefeldgraphen den Vorteil, eine kombiniert Betrachtung von Technologie- und Anwendungsfeldern vorzunehmen und so Anforderungen an die Technologieentwicklung abzuleiten. So wird insbesondere die frühzeitige Synchronisierung von Produkt- und Technologieinnovationen sichergestellt und die Abhängigkeit quantitativ bewertet.

Das *Brainstorming* als Kreativmethodik zielt auf eine schnelle Lösungsfindung durch einen breiten Teilnehmerkreis ab. Jedoch werden sehr konkrete Zielstellungen verfolgt und durch die kreative Herangehensweise ein strukturierter Überblick über komplexe Technologie- und Themenfelder nicht ermöglicht. Der vorgestellte Methodenansatz bietet gegenüber dem Brainstorming den Mehrwert, Technologiefelder zu strukturieren und durch das mehrstufige Verfahren der Informationsbeschaffung zu systematisieren. Somit wird die Erarbeitung von Lösungen für technologische oder konzeptionelle Handlungsbedarfe in den Gesamtzusammenhang des Technologiefelds eingeordnet und Synergien sichtbar gemacht. Die Dokumentation der Anforderungen in Form von Steckbriefen ermöglicht zudem eine spätere Nachverfolgung für die Konzeptentwicklung.

Die *Modellsimulation* zielt auf die Analyse von Veränderungsprozessen innerhalb und außerhalb des Unternehmens ab. Die Modellierung und Folgenabschätzung findet jedoch auf einem sehr hohen Abstraktionsniveau statt, sodass für die strategische Technologieplanung kaum Rückschlüsse auf individuelle Technologien oder konkrete Projekte unterschiedlicher Reifegrade gezogen werden können. Der entwickelte Methodenansatz bietet hier den Mehrwert, marktseitige Änderungsprozesse mit konkreten technologischen, monetären und zeitlichen Kennwerten zu beschreiben, diese auf eine Technologie- und Konzeptentwicklung abzubilden und in Anforderungen zu überführen. Somit wird der Zielstellung des strategischen Technologiemanagements nachgekommen, die Technologiestrategie zu konkretisieren und konkrete Vorgaben für die operativen Aktivitäten abzuleiten (vgl. Abschnitt 3.3.1).

Die Vorteile des Methodenansatzes gegenüber der *Patentanalyse* ähneln denen der Bibliometrie. Durch die Patentanalyse können Verflechtungen und Abhängigkeiten innerhalb von Patentschriften analysiert und so die Entwicklungsrichtungen abgeschätzt und Schlüsseltechnologien identifiziert werden. Eine Bewertung der Technologien im Unternehmenskontext findet in der Patentanalyse nicht statt. Hier lässt sich der Mehrwert des entwickelten Methodenansatzes erkennen, da eine Bewertung immer im Kontext der Unternehmensausrichtung erfolgt (vgl. Abschnitt 5.4.3). Durch die Nutzung der funktionalen Produktstruktur wird zudem die Identifikation von technologischen Whitespots ermöglicht, was durch eine reine Patentanalyse nicht möglich ist.



**Tabelle 7.2:** Mehrwert des Methodenansatzes gegenüber bestehenden Ansätzen

Klassischer Methodenansatz	Mehrwert des eigenen Methodenansatzes
Bibliometrie	Verknüpfung von Technologiefeldern mit Anwendungsfeldern und Bewertung im Sinne der Unternehmensstrategie
Brainstorming	Integration von Technologie- und Konzeptentwicklung in den Gesamtzusammenhang des Themenfelds
Modell-Simulation	Ableitung konkreter technologischer und monetärer Handlungsbedarfe für die Entwicklung
Patentanalyse	Technologiebewertung im Kontext der Unternehmensausrichtung und -strategie
S-Kurven-Analyse	Bewertung im Kontext der Unternehmensausrichtung und Berücksichtigung von Wechselwirkungen
SWOT-Analyse	Ableitung konkreter Anforderungen an die Technologieentwicklung und Berücksichtigung von Interdependenzen
Szenariotechnik	Hierarchische Strukturierung der Problemstellung und Einbeziehung von quantitativen Technologiereifegraden
Technologieportfolio	Darstellung von Abhängigkeiten zwischen den Elementen und Einbezug von Reifegraden
Technologieroadmapping	Berücksichtigung von Technologiereife und Dynamisierung des Roadmappings
Wechselwirkungsanalyse	Einbezug von Abhängigkeiten in hierarchischen Problemstellungen und Einbezug der Unternehmensstrategie

Mit der *S-Kurven-Analyse* kann die maximale Leistungsfähigkeit von Technologien abgeschätzt und so eine Aussage über die Notwendigkeit eines Technologiewechsels abgeleitet werden. Der Ansatz berücksichtigt keine Anforderungen in der Bewertung oder die Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Technologien. Eine Bewertung findet zudem immer technologieindividuell im Kontext einer spezifischen Fragestellung statt. Der entwickelte Methodenansatz bietet an dieser Stelle den Mehrwert, die Bewertung in einem gesamtheitlichen Kontext vorzunehmen und Wechselwirkungen zu berücksichtigen. Durch den Einbezug der technologischen Reifegrade wird zudem eine vergleichbare Kenngröße für die Leistungsfähigkeit in der Bewertung berücksichtigt.

Im Rahmen der *SWOT-Analyse* erfolgt die Strategieformulierung auf einem hohen Abstraktionsniveau, sodass für die Technologieentwicklung kaum konkrete Anforderungen abgeleitet werden. Ebenso müssen Abhängigkeiten zwischen zukünftigen Entwicklungen intuitiv identifiziert werden. Mithilfe des in Kapitel 5 beschriebenen Methodenansatzes ist es hingegen möglich, die Interdependenzen systematisch zu identifizieren und das Vorgehen der Bewertung zu konkretisieren. So werden komplexe Technologiefelder für eine Bewertung beherrschbar gemacht und die Definition konkreter Vorgaben für die Technologieentwicklung ermöglicht. Ferner stellt der dynamische Charakter des Methodenansatzes die Berücksichtigung von dynamischen Veränderungen sicher. Dies ist bei der statischen SWOT-Analyse nicht möglich.

Mit der *Szenariotechnik* wird eine Methodik zur Verfügung gestellt, die eine Prognose zukünftiger exogener und endogener Randbedingungen ermöglicht. Hierbei werden keine Reifegradentwicklungen der Technologien berücksichtigt. Die Bildung konsistenter Szenarien setzt weiterhin ein breites Wissen über die Zusammenhänge des betrachteten Themenfelds voraus. Im Gegensatz hierzu bietet der beschriebene Methodenansatz den Mehrwert, dass eine hierarchische Strukturierung der Problemstellung erfolgt und so Teilbereiche ohne detailliertes Vorwissen betrachtet werden können. Beispielsweise kann die Verknüpfung von Funktionen und Technologien ohne konkretes Szenariowissen erfolgen. Durch die Definition der zu erwartenden Reifegradentwicklungen durch Technologieexperten wird zudem eine valide Entscheidungsgrundlage sichergestellt.

In einem *Technologieportfolio* werden Technologien in den Dimensionen der Attraktivität und der Kompetenz bewertet und entsprechend eine Handlungsempfehlung abgeleitet. Die Attraktivität und die Kompetenz müssen individuell abgeschätzt werden, sodass eine Abbildung von Abhängigkeiten und Reifegraden nicht sinnvoll ist. Der Ansatz des Technologiefeldgraphen bietet die Möglichkeit, sowohl externe Bedarfe und die Attraktivität als auch technologische Potenziale in Relation zu setzen und bei der Priorisierung Abhängigkeiten und Reifegrade zu berücksichtigen. Ferner bietet der entwickelte Ansatz die Möglichkeit, über die bereits bekannten Technologien hinaus defizitäre Funktionen in der Produktstruktur zu identifizieren. So werden Whitespots aufgezeigt, die durch eine interne Entwicklung oder externe Beschaffung zu schließen sind.

Anhand der Anwendung des Methodenansatzes auf das Technologiefeld ASR wird dieser Mehrwert weiter veranschaulicht. Durch den Methodenansatz werden die relevanten Szenarien für die Technologieentwicklung der *optischen Mustererkennung* identifiziert. Die Anforderungen der Szenarien *automatischen Laden in Privatgaragen* und *Pannensituationen in AMoD* werden so während der Technologieentwicklung berücksichtigt und die Auswirkungen der Technologieentwicklung abgeschätzt. Weiterhin erlaubt der Technologiefeldgraph die Rückführung der Ergebnisse und die dynamische Anpassung der Entscheidungsgrundlage. So verschieben sich die Prioritäten für die Technologieentwicklung nach der Weiterentwicklung zu Gunsten der Funktion *Personensicherheit im öffentlichen Raum*.

Der Mehrwert des Methodenansatzes zeigt sich auch in der Konzeptentwicklung des *Laderoboters für Privatgaragen*. Der monetäre Handlungsbedarf wird in Anforderungen für die Konzeptentwicklung überführt. Durch den Technologiefeldgraphen werden relevante Technologien auf Grundlage der Funktionsbeschreibung identifiziert. Ein Reifegradabgleich ermöglicht weiterhin eine Vorauswahl der Technologien. Dieser Mehrwert zeigt sich auch bei der Konzeptentwicklung des *Reinigungsmulticopters*. Durch den Methodenansatz werden die Abhängigkeit des Szenarios *Pannensituation in AMoD* identifiziert und folglich die Konzeptentwicklung auf die Technologieentwicklung abgestimmt. Ebenso wird für den Use Case der *Sensorreinigung in kritischen Situationen* die Reinigungstechnik als abgeschlossenes Themenfeld identifiziert. Diese kann folglich isoliert vom Rest des Technologiefelds betrachtet werden, da keine Abhängigkeit zu anderen Szenarien und Use Cases besteht.

Auch in der Entwicklung des *Parkroboters* ist der Mehrwert des Methodenansatzes erkennbar. Das Konzept stellt eine Alternativlösung zum Konzept des *automatisierten Valet-Parkens durch das Fahrzeug* dar. Entsprechend werden die adjazenten Funktionen für den *Parkroboter* übernommen. Um eine frühzeitige Realisierung zu ermöglichen, kommen jedoch Alternativtechnologien zum Einsatz, die den Reifegradanforderungen des Szenarios entsprechen. Bei einem klassischen

Entwicklungsvorgehen nach VDI 2221 [184] bildet die Anforderungsdefinition in Form eines Lastenhefts die Grundlage für die Entwicklung. Die Erstellung des Lastenhefts kann auf Grundlage der Szenariobeschreibungen des TFG erfolgen und z. B. auf den definierten technischen Randbedingungen aufbauen. Die Konzeptbildung wird in der Technologieauswahl darüber hinaus durch die Prioritätenbestimmung unterstützt. So wird sichergestellt, dass bei einer Neuentwicklung von Konzepten auf Technologien zurückgegriffen wird, die bereits einen ausreichenden Reifegrad und eine hohe Priorität für das Technologiefeld aufweisen. Eine zu breite Technologieanwendung wird ebenfalls vermieden und der Aufbau strategischer Kompetenzen für Schlüsseltechnologien unterstützt werden.

Die Anwendung des Methodenansatzes und der Vergleich mit bestehenden Verfahren zeigt, dass der Einsatz von graphentheoretischen Konstrukten in der strategischen Technologieplanung bei der Strukturierung und Bewertung komplexer Wechselwirkungen einen Mehrwert aufweist. Entsprechend kann die in Abschnitt 1.5 aufgestellt Hypothese als nachgewiesen betrachtet werden. Am Technologiefeld ASR wurde gezeigt, dass der entwickelte Ansatz für die strategische Ausrichtung und Ableitung von Handlungsempfehlungen herangezogen werden kann. Der Technologiefeldgraph bietet die Möglichkeit zur detaillierten Betrachtung und strategischen Planung in frühen Entwicklungsphasen. Bestehende Ansätze können diese Funktionalitäten, beispielsweise die Analyse von Zusammenhängen in funktionalen Produktstrukturen oder variierende Technologiereifegrade, nicht abbilden. Der graphentheoretische Ansatz ermöglicht die Synchronisierung von marktseitigen Anforderungen mit technologieseitigen Potenzialen in frühen Phasen von Technologiefeldern. Das strategische Technologiemanagement wird insbesondere bei der Konkretisierung der Technologiestrategie und der Ausgestaltung konkreter Projekte unterstützt. Die operative Technologieplanung profitiert hierbei von der detaillierten Bewertung des Handlungsbedarfs und der zeitlich dynamischen Betrachtung.

Um darüber hinaus den Methodenanwender in der Praxis zu unterstützen, werden im Folgenden verschiedene Auswahlkriterien beschrieben. Die Kriterien definieren Anwendungsfälle, in denen die Verwendung des entwickelten Methodenansatzes anderen Ansätzen vorzuziehen ist. Gegenüber bestehenden Ansätzen ist die Methode des Technologiefeldgraphen zu bevorzugen, wenn

- sich das betrachtete Technologiefeld in einer frühen Phase der Entwicklung befindet,
- Technologien unterschiedlicher Reifegrade bewertet werden müssen,
- heterogene Technologien und Anwendungsfälle betrachtet werden,
- eine hohe Entwicklungsdynamik vorherrscht,
- begrenzte Ressourcen zur Verfügung stehen und die Notwendigkeit einer Priorisierung besteht sowie
- eine Strukturierung des Technologiefelds notwendig ist.

Die beschriebenen Kriterien ergeben sich zum einen aus dem Mehrwert des Methodenansatzes gegenüber klassischen Ansätzen, zum anderen aus den Zielstellungen dieser Arbeit. Sie stellen jedoch kein Ausschlusskriterium dar, auch für Fragestellungen außerhalb der beschriebenen Randbedingungen kann ein Einsatz zielführend sein. Insbesondere die Fokussierung auf eine

kombinierte, dynamische Bewertung von semi-quantitativen Technologiereifegraden und Kostenentwicklungen stellt ein Alleinstellungsmerkmal des entwickelten Ansatzes dar. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Einsatzbereich des Methodenansatzes auf die Phase der strategischen Technologieplanung ausgerichtet ist. Eine Abgrenzung des Methodenansatzes sowie die Beschreibung der Limitation in der Anwendung bilden daher die nächsten Schritte der Validierung.

### 7.3 Einsatzbereiche des Methodenansatzes

Im Rahmen dieses Abschnitts werden die Einsatzbereiche des Methodenansatzes für den Anwender zusammengefasst und die Limitation der Anwendung beschrieben. Die Limitationen dienen zugleich als Grundlage für die Identifikation weiteren Handlungsbedarfs im Rahmen des Ausblicks (vgl. Abschnitt 8.2). Durch die Abgrenzung soll der zukünftige Einsatzbereich in seiner Breite anhand der Phasen des Technologiemanagements bestimmt werden. Durch die Limitationen wird die Tiefe des Einsatzbereichs anhand der Aufgaben des Technologiemanagements definiert. Zum Abschluss werden anhand der Beispielanwendung weitere Limitationen beschrieben, die in der Praxisanwendung auftreten. An dieser Stelle ist zu berücksichtigen, dass der Methodenansatz für die Anwendung in der Technologieplanung ausgerichtet ist. Entsprechend ist eine Anwendbarkeit in den angrenzenden Phasen als vorteilhafter Nebeneffekt zu betrachten. Ähnliches gilt für die funktionale Ausrichtung. Der entwickelte Ansatz ist auf eine strategische Anwendung ausgerichtet, die Einsatzmöglichkeiten in den operativen Tätigkeiten erweitern lediglich diese Ausrichtung. In Tabelle 7.3 ist der Einsatzbereich des Methodenansatzes visualisiert. Hierbei werden die Phasen der Technologieverwertung und des Technologieschutzes vernachlässigt, da diese nicht Zielstellung der Methodenentwicklung sind und eine Anwendung dort nur geringen Mehrwert liefert. In der Horizontalen sind die Phasen des Technologiemanagements und die zeitliche Ausrichtung aufgetragen. Diesem gegenübergestellt sind in der Vertikalen die Aufgaben der strategischen Technologieplanung und die funktionale Ausrichtung, für die der Methodenansatz geeignet ist.

#### 7.3.1 Abgrenzung

Durch den Methodenansatz ist es möglich, komplexe Technologiefelder zu systematisieren und marktseitige Anforderungen in die Technologieentwicklung zu überführen. Durch eine frühe Phase der Anwendung wird die Technologiestrategie in separate Technologieprojekte überführt und die technologische Ausrichtung konkretisiert. Die Dynamisierung des Graphen und der Roadmappingprozesse stellen die Synchronisierung von Produkt- und Technologieplanung sicher. Die Anwendung beschränkt sich hierbei aktuell auf die strategische Technologieplanung und den Übergang zur operativen Planung. Eine darüber hinausgehende Bewertung ist grundsätzlich denkbar, setzt jedoch eine Erweiterung der Datenbasis des Technologiefeldgraphen voraus und erfordert eine Erweiterung der Informationsbewertungsphase (vgl. Abschnitt 5.4). In der Phase der Früherkennung wird durch den Methodenansatz zudem die Identifikation von zukünftigen Schlüsseltechnologien ermöglicht, die in Einklang mit der Produktplanung stehen. Der Suchradius für neue Technologien beschränkt sich jedoch auf Elemente, die innerhalb der Informationsbeschaffungsphase in den TFG integriert werden.

**Tabelle 7.3:** Zeitliche und funktionale Ausrichtung des Methodenansatzes im Technologiemanagement

früh ← zeitliche Ausrichtung → spät							
Technologiefrüherkennung							
Technologiebewertung							
strategische Technologieplanung							
operative Technologieplanung							
Technologieentwicklung							
						Konkretisierung und Umsetzung einer Technologiestrategie	strategisch
						Steuerung der technologischen Unternehmensausrichtung	
						Synchronisierung von Produkt- und Technologieplanung	
						Definition des Technologietimings	↑ funktionale Ausrichtung
						Technologieauswahl (strategisch und operativ)	
						Definition der Technologiequelle (intern und extern)	
						Definition der techn. Leistungsfähigkeit	↓ operativ
						Wirtschaftliche Betrachtung des Technologieeinsatzes	
						Erarbeitung von Technologieplänen	
						Initiierung von Technologieprojekten	operativ
						Steuerung von Technologieprojekten	
						Ausgestaltung von Technologieprojekten	

Durch die Informationsbewertungsphase des Methodenansatzes wird eine strategische Technologieauswahl unter Berücksichtigung marktseitiger und technischer Entwicklungstendenzen geschaffen. So werden Schlüsseltechnologien und Whitespots identifiziert, die operative Technologieplanung konkretisiert und die Entwicklung gesteuert. Die Definition der Technologiequelle wird durch den Methodenansatz ebenfalls unterstützt. Durch die Steckbriefe sind sowohl unternehmensexterne als auch -interne Quellen definiert. Eine Auswahl konkreter Technologielieferanten erfolgt somit immer im Kontext der übergeordneten Unternehmensstrategie und der Strategien benachbarter Technologiefelder. Gleiches gilt für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit. Durch den Methodenansatz erfolgt eine wirtschaftliche Grobbewertung während der Identifikation relevanter Technologien. Eine detaillierte Bewertung und Anwendung verschiedener Kalkulationsmodelle kann auf diesen Ergebnisse aufbauen und den Informationsgehalt des TFG erweitern. So

kann auch das in dieser Arbeit gewählte, vereinfachte Modell der Herstellkosten ergänzt werden. Durch die Definition einer Reifegradanforderung in der Szenariobeschreibung können quantitative Handlungsbedarfe bestimmt und die Leistungsfähigkeit für die nachfolgende Entwicklung eingegrenzt werden. Eine Ableitung konkreter Leistungsparameter ist möglich, wenn diese im Rahmen der technischen Rahmenbedingungen der Szenarien beschrieben sind. Entsprechend ist der Methodenansatz für Anwendung in den operativen Aktivitäten des Technologiemanagements um diese technischen Informationen zu ergänzen. Einen breiten Anwendungsbereich besitzt der Methodenansatz in der Definition des Technologietimings, da konkrete Zeitvorgaben für die operative Planung und Entwicklung definiert werden. Im Rahmen der Entwicklung müssen diese Vorgaben technologiespezifisch konkretisiert werden. Die Erarbeitung von Technologieplänen wird durch die Roadmaperstellung umgesetzt und fokussiert die strategische Ausrichtung des Methodenansatzes. Als langfristiges Planungswerkzeug wird die operative Technologieplanung unterstützt. Analog zum Technologietiming müssen diese Technologiepläne im Zuge der Entwicklung weiter konkretisiert werden. Durch die Identifikation von Schlüsseltechnologien und Whitespots werden durch den Methodenansatz Technologieprojekte zur Kompensation des Handlungsbedarfs initiiert und aufeinander abgestimmt. Die konkrete Steuerung und Ausgestaltung der Projekte als operative Tätigkeit wird hierbei in der Zielsetzung unterstützt.

In der zeitlichen Dimension ist der Einsatzbereich des Methodenansatzes auf die strategische Technologieplanung und Technologiebewertung ausgerichtet. Es bestehen darüber hinaus Überschneidungen mit den Phasen der Früherkennung oder der operativen Planung bis hin zur Entwicklung. Aufgrund der strategischen Ausrichtung des Ansatzes ist ein Einsatz in der Früherkennung aktuell nur eingeschränkt möglich. Der Ansatz der erweiterten Wechselwirkungsanalyse weist jedoch grundsätzlich das Potenzial auf, auch in diesen Phasen zur Anwendung zu kommen. Da die Anwendung in der Technologieverwertung oder zum Technologieschutz nicht Zielstellung dieser Arbeit ist, ist der Methodenansatz im aktuellen Entwicklungsstand in diesen Phasen nicht direkt anwendbar. Eine Erweiterung auf diese Phasen ist jedoch denkbar, da beispielsweise die Identifikation von Schlüsseltechnologien auch zum Technologieschutz eingesetzt werden kann.

### 7.3.2 Limitationen

In der Praxisanwendung wird deutlich, dass die Informationsbeschaffungsphase mit einem hohen manuellen Aufwand verbunden ist. Die Differenzierung in Technologie- und Anwendungsexperten sowie interne und externe Teilnehmer liefert ein Potenzial für Doppelarbeit. Es ist darauf zu achten, dass die Überschneidung von Kompetenzen minimal gehalten wird. Das workshopbasierte Vorgehen setzt ebenfalls eine gezielte Auswahl des Teilnehmerkreises voraus und beeinflusst indirekt die resultierenden Ergebnisse. Durch die frühe Phase, in der der entwickelte Methodenansatz zum Einsatz kommt, müssen die Teilnehmer zum einen Innovationen gegenüber offen sein. So werden neue Einsatzbereiche für bereits bestehende Technologien identifiziert. Zum anderen müssen die technologischen Limitationen realistisch abgeschätzt werden, was durch eine konservative Einstellung der Workshopteilnehmer unterstützt wird. Bei der Zusammensetzung der Workshopteilnehmer steigert somit ein ausgewogenes Verhältnis aus erfahrenen und innovationsoffenen Personen die Qualität der Ergebnisse. Zudem zeigen die Erfahrungen der Workshops im Rahmen des Technologiefelds ASR (vgl. Abschnitt 5.2), dass ein konkretes Vorwissen der Teilnehmer über das betrachtete Technologiefeld die Qualität der Ergebnisse verbessert.

Eine weitere Limitation lässt sich in der Berücksichtigung disruptiver Technologiewechsel finden. Das Potenzial innovativer Technologien, die einen sehr geringen Technologiereifegrad aufweisen, kann u. U. überschätzt werden. Dies führt während der Informationsverarbeitungsphase dazu, dass eine hohe Anzahl potenziell realisierbarer Funktionen für eine Technologie definiert wird. In der Informationsbewertungsphase führt dies final zu einer hohen Priorisierung der Technologie, die nicht den realen Einsatzbereichen der Technologie entspricht. Folglich gilt es, insbesondere für Technologien mit geringen Reifegraden, eine regelmäßige Überprüfung der adjazenten Funktionen vorzunehmen. Somit können die Informationen des TFG den aktuellen Stand der Entwicklung adäquat repräsentieren. Ferner besteht in der Anwendung die Möglichkeit, dass die Entwicklungsgeschwindigkeit von Technologien von Experten überschätzt werden [38]. Entsprechend resultieren unrealistische Reifegradverläufe in der Informationsbeschaffungsphase. Die Bestimmung des Handlungsbedarfs besitzt in diesem Fall nur eingeschränkte Aussagekraft. Es gilt daher, die definierten Reifegradverläufe der Szenarien-, Konzept- und Technologiesteckbriefe kritisch zu prüfen und in der Diskussion verschiedener Experten zu definieren. Durch eine regelmäßige Validierung der Steckbriefe durch externe Technologieexperten kann diesem Risiko ebenfalls entgegengewirkt werden.

## 7.4 Übertragbarkeit des Methodenansatzes

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Methodenansatzes, der das strategische Technologiemanagement in der frühen Phase von Technologiefeldern unterstützt. Im Rahmen von Abschnitt 2.4 werden hierzu aus dem konkreten Beispiel des Technologiefelds Automotive Service Robotics allgemein gültige Anforderungen an einen Ansatz abgeleitet. Diese Verallgemeinerung soll sicherstellen, dass eine grundsätzliche Übertragbarkeit des Methodenansatzes auf andere Technologiefelder gegeben ist. Während der Methodenentwicklung (vgl. Kapitel 5) werden hierzu einerseits die allgemeinen Anforderungen an Ansätze des Technologiemanagements berücksichtigt (vgl. Anhang A.12). Andererseits werden im Rahmen von Abschnitt 3.6 universelle Formulierungen für die Konkretisierung der Zielstellung gewählt. Die Anwendung des Ansatzes auf Automotive Service Robotics (vgl. Kapitel 6) zeigt an einem konkreten Beispiel, dass diese Zielstellungen erfüllt werden. Dieser Abschnitt zeigt darüber hinaus notwendige Schritte für die Adaption des Ansatzes auf andere Technologiefelder auf, um den Praxisanwender zu unterstützen. Anhand des Phasenmodells des Methodenansatzes werden mögliche Schritte der Adaption dargestellt. Ferner werde die Möglichkeiten zur Anwendung des Ansatzes anhand von zwei abstrakten Beispielen erläutert und die Technologiefelder des *automatisierten Fahrens* und der *automobilen Endmontage* betrachtet.

**Informationsbeschaffungsphase** Das Ziel der Informationsbeschaffungsphase ist es, die relevanten Informationen für das Technologiefeld zusammenzutragen und zu dokumentieren. Mit der Definition von Szenarien und Use Cases werden die exogenen Anforderungen an ein Technologiefeld in einer lösungsneutralen Form beschrieben. Die Anwendung des Technologiereifegradmodells (vgl. Abschnitt 5.2.1) ermöglicht eine Übertragbarkeit auf beliebige Fragestellungen, lediglich die dokumentierten technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen der Steckbriefe gilt es technologiefeldspezifisch anzupassen. Die funktionale Produktbeschreibung ist die Grundlage des Relationsmodells und für die Vernetzung von marktseitigen Anforderungen mit

technologischen Potenzialen. Voraussetzung für die Anwendung des Methodenansatzes ist, dass eine funktionale Produktbeschreibung der Use Cases möglich ist. Die Notwendigkeit zwischen Hauptfunktionen und Teilfunktionen zu differenzieren, ist im Angesicht der verfolgten Fragestellung zu prüfen. Hat die Anwendung des Ansatzes lediglich eine Grobbewertung der strategischen Ausrichtung des Unternehmens zum Ziel, kann eine Beschränkung auf die Hauptfunktionen der Use Cases zielführend sein, da sich der nachgelagerte Aufwand für Technologieidentifikation und Vernetzung reduziert. Mit den Technologie- und Konzept- bzw. Produktsteckbriefen werden die Umsetzungspotenziale dokumentiert. Das Technologiereifegradmodell behält auch hier seine Gültigkeit und die Klassifizierungsmerkmale sind technologiefeldübergreifend zu verwenden. Analog zur Dokumentation der Szenarien und Use Cases müssen die technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen an das betrachtete Feld angepasst werden. Für die Beschreibung der Konzepte gilt dies ebenfalls.

**Informationsverarbeitungsphase** Im Kern der Informationsverarbeitungsphase stehen das Datenschema, das die Attribute der Knotenelemente definiert, und das Relationsmodell, das die Abhängigkeiten zwischen den Knotenelementen beschreibt. Die Attribute des Datenschemas stehen in enger Abhängigkeit zu den Informationen des Steckbriefe. Für die Anwendung des Methodenansatzes auf andere Technologiefelder kann die Abänderung der dokumentierten Informationen zielführend sein, entsprechend müssen diese auch auf das Datenschema übertragen werden. Der grundsätzliche Aufbau des Schemas bleibt jedoch bestehen. Auch die Erweiterung des Datenschemas um neue Knotentypen ist grundsätzlich möglich, sollte dies für die Anwendung sinnvoll sein. Diese Erweiterung muss jedoch auch mit einer Erweiterung des Relationsmodells einhergehen.

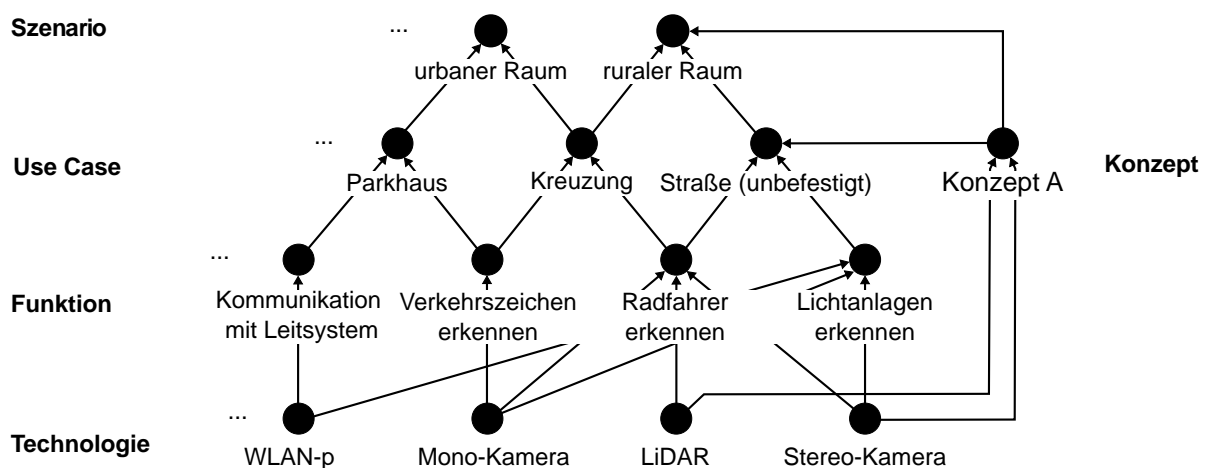
Das Relationsmodell baut auf den Ebenen der Szenarien, Use Cases, Funktionen, Technologien und Konzepte auf und stellt einen allgemeingültigen Ansatz dar, um Technologiefelder zu beschreiben. Unter Umständen ist es notwendig, dieses Relationsmodell um eine oder mehrere Ebenen zu erweitern. Im Rahmen der Beispielanwendung auf das Technologiefeld 3D-Druck wird dieser Sachverhalt deutlich. Der Aufbau des in Abschnitt 5.3.2 beschriebenen Relationsmodells ist in Lage, um entsprechende Ebenen erweitert zu werden. So ist beispielsweise für die Ausweitung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung die Assoziation von Geschäftsmodellen zu Konzepten und Szenarien denkbar, um die Bewertung über die Herstellkosten hinaus zu erweitern. Ein weiteres Beispiel ist die Erweiterung des Relationsmodells um die Ebene der *Technik*. In Anlehnung an Abschnitt 3.1.1 stellt Technik eine produkthafte Ausprägung einer Technologie dar. Durch die Integration von Technik in das Relationsmodell besteht das Potenzial, konkrete technische Parameter der Produkte in die Bewertung einfließen zu lassen. Zu berücksichtigen ist, dass die hinterlegten Daten zum einen im Rahmen der Informationsbeschaffungsphase abgefragt werden und zum anderen in das Datenschema eingearbeitet werden. In welchem Abschnitt der Informationsbeschaffung diese Abfrage erfolgt, wird durch die Position der eingefügten Ebene im Relationsmodell definiert. Der Technologiefeldgraph ist hierauf anzupassen und die resultierende Relationsmatrix zu definieren. Das grundsätzliche Vorgehen zur Ableitung der Relationsmatrix ist jedoch identisch zum beschriebenen Vorgehen (vgl. Abschnitt 5.3.2).

**Informationsbewertungsphase** Der Aufbau der Informationsbewertungsphase und die Berücksichtigung von Technologiereifegrad und Herstellkosten stellen einen allgemeingültigen



Ansatz dar. Dieser Ansatz kann, wie auch das Relationsmodell, für spezifische Technologiefelder adaptiert werden, sofern dieses sinnvoll erscheint. Zum einen können zusätzliche Bewertungsparameter berücksichtigt werden. In diesem Fall ist das Vorgehen der Bewertung auf Grundlage des Relationsmodells und des Datenschemas auszurichten. Der grundsätzliche Ablauf richtet sich jedoch nach den beschriebenen Verfahren. Zum anderen kann die Ergänzung zusätzlicher Ebenen in das Relationsmodell zu einer Anpassung der Bewertungsphase führen. Die Bestimmung von Relevanz und Abhängigkeit kann in diesem Fall identisch übernommen werden. Bei der Analyse von technischer und wirtschaftlicher Realisierbarkeit ist zu bewerten, in wie weit sich die eingefügte Ebene auf das gesamte Relationsmodell auswirkt. In diesem Fall ist auch die Bestimmung des Handlungsbedarfs anzupassen und der Einfluss der neu hinzugefügten Knotenelemente zu bewerten. Die Visualisierung des Technologiefeldgraphen ist unabhängig von einer Anpassung des Relationsmodells und kann somit unverändert übernommen werden. Auch die Ableitung einer Technologieroadmap kann bei einer technologiefeldspezifischen Anpassung nach dem Vorgehen aus Abschnitt 5.4.7 erfolgen, sofern die Ebenen der Szenarien, Use Cases, Produkte und Technologien im Relationsmodell erhalten bleiben.

**Beispielanwendung automatisiertes Fahren** Um die Übertragbarkeit des entwickelten Methodenansatzes auf andere Technologiefelder zu verdeutlichen, ist in Abbildung 7.1 eine Beispielanwendung aus dem Themenfeld des automatisierten Fahrens entsprechend dem Relationsmodell (vgl. Abschnitt 5.3.2) dargestellt. Um die Übersichtlichkeit zu bewahren, ist an dieser Stelle lediglich ein Beispiel mit reduzierter Komplexität dargestellt. Auch auf die Darstellung der Bewertungsphase wird an dieser Stelle verzichtet.

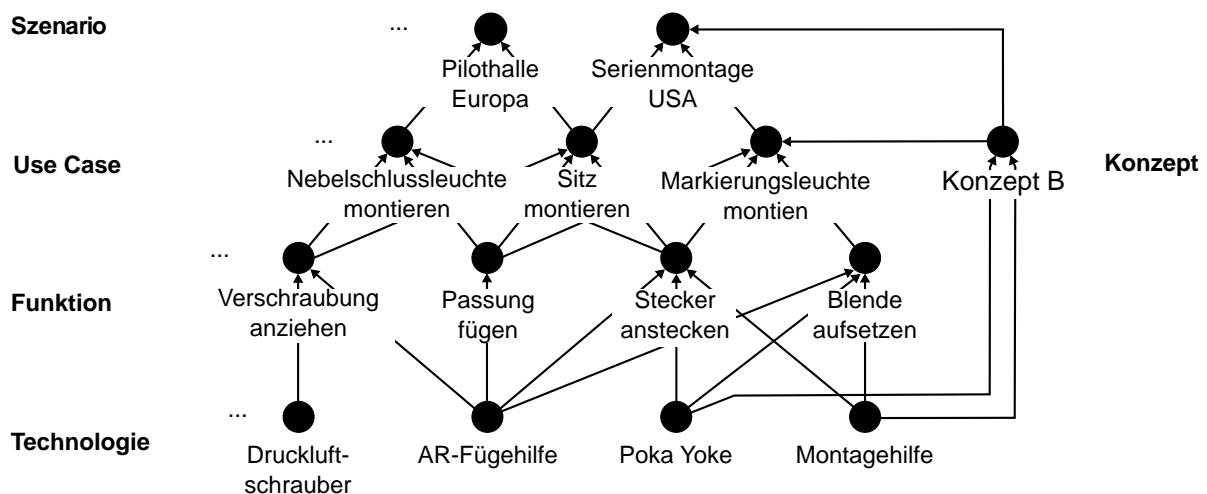


**Abbildung 7.1:** Exemplarische Anwendung des Ansatzes auf das Technologiefeld *automatisiertes Fahren*

Im Themenfeld des automatisierten Fahrens lassen sich über die Ebenen Szenario und Use Cases verschiedenste Situationen im Straßenverkehr beschreiben und mit den entsprechenden Anforderungen hinterlegen. Entsprechend dem Vorgehen des Methodenansatzes können aus diesen Situationsbeschreibungen die relevanten Funktionen, wie beispielsweise die *Erkennung von Verkehrszeichen*, abgeleitet werden. Mit der Ebene der Technologien können ferner die umsetzungsrelevanten Technologien verknüpft werden und entsprechende Konzepte beschrieben

werden. Die Darstellung in Form eines Technologiefeldgraphens eröffnet die Möglichkeit zur Anwendung der in Abschnitt 5.4 beschriebenen Ansätze zur Bewertung und ermöglicht somit eine systematische Technologieplanung.

**Beispielanwendung *automobile Endmontage*** Neben Technologiefeldern, die einen direkten Endkunden adressieren, lässt sich der entwickelte Methodenansatz auch auf Fragestellungen in den indirekten Bereichen eines Unternehmens anwenden. Um dies zu verdeutlichen und die Übertragbarkeit nachzuweisen, ist in Abbildung 7.2 eine exemplarische Anwendung auf das Technologiefeld der automobilen Endmontage dargestellt. Über die Ebene der Szenarien können unterschiedliche Regionen aber auch unterschiedliche Reifegradanforderungen dargestellt und dokumentiert werden. So können neben Serienprozessen auch Betrachtungen in der Vorserie einbezogen werden. Über die Use Cases können Anwendungen entlang der Montageprozesse beschrieben werden und, entsprechend dem Relationsmodell, die Funktionen abgeleitet werden. Analog zu dem in Kapitel 5 beschriebenen Vorgehen, lassen sich die relevanten Technologien allokalieren und entsprechend mit den Anforderungen der Szenarien abgleichen. So können regionspezifische Anforderungen, beispielsweise an Sicherheitsstandards oder Temperaturbereiche, und schwankende Technologiereifegrade berücksichtigt werden sowie spezifische Roadmaps generiert werden.



**Abbildung 7.2:** Exemplarische Anwendung des Ansatzes auf das Technologiefeld *automobile Endmontage*

Die exemplarische Anwendung auf die beschriebenen Themenbereiche zeigt, dass der Methodenansatz und das zugrundeliegenden Relationsmodell auch auf Technologiefelder abseits von Automotive Service Robotics anwendbar ist. Die individuelle Eignung ist jedoch immer unter den in Abschnitt 7.1 beschriebene Kriterien zu bewerten.

## 7.5 Zusammenfassung

Die Anwendung auf das Technologiefeld ASR zeigt, dass der Methodenansatz zur Analyse von Technologiefeldern im Sinne des strategischen Technologiemanagements geeignet ist und

die in Abschnitt 3.6 gesetzte Zielstellung erfüllt. Der Mehrwert gegenüber bestehenden Ansätzen liegt insbesondere in der Identifikation und Bewertung komplexer Abhängigkeiten sowie der Abbildung dynamischer Entwicklungsvorgänge. In der Unternehmensfunktion des Technologiemanagements ordnet sich der Ansatz in die frühe Phase der Technologiebewertung und strategischen Technologieplanung ein. Ferner ist der Ansatz auch in der operativen Technologieplanung anwendbar. Die funktionale Ausrichtung beschränkt sich vornehmlich auf Aufgaben wie die Technologieauswahl, das Technologietiming und die Synchronisierung von Produkt- und Technologieentwicklung. Die exemplarische Anwendung auf weitere Technologiefelder zeigt, dass der Ansatz auch außerhalb von Automotive Service Robotics für die strategische Technologieplanung geeignet ist. Durch Erweiterungen innerhalb des Phasenmodells, können zudem technologiefeldspezifische Fragestellungen adressiert werden.

## 8 Schlussbetrachtung

Um das Technologiemanagement in strategischen Entscheidungssituationen, wie der Priorisierung von Technologieprojekten und der Bestimmung von Handlungsbedarf in komplexen Technologiefeldern, zu unterstützen, bedarf es der Entwicklung eines geeigneten Methodenansatzes. Hierbei gilt es, Wirkbeziehungen zwischen relevanten Einflussfaktoren des Technologiefelds zu identifizieren, zu dokumentieren und synchronisierte Anforderungen an die Technologie- und Produktentwicklung abzuleiten. Ferner gilt es, dynamische Änderungen von technologischen und anforderungsorientierten Randbedingungen auf den Entscheidungsraum abzubilden. Dieses Defizit wird in der Arbeit aufgegriffen und ein geeigneter Methodenansatz zur Unterstützung des Technologiemanagements entwickelt.

Der Fokus der Anwendung des in dieser Arbeit entwickelten Methodenansatzes liegt im Technologiefeld Automotive Service Robotics. In diesem Feld werden die Einsatzpotenziale innovativer Robotersysteme für Service- und Wartungsaufgaben an automatisiert fahrenden Fahrzeugen im privaten oder kommerziellen Kontext untersucht. Durch die Kombination des interdisziplinären Felds der Robotik und des Felds der automatisierten Fahrfunktionen, seinerseits geprägt durch eine hohe Entwicklungsdynamik, sind strategische Entscheidungen durch ein hohes Maß an Unsicherheit geprägt. Eine intuitive Ausrichtung der Entwicklungstätigkeiten ist nicht möglich und bedarf einer neuartigen Herangehensweise.

### 8.1 Zusammenfassung

Technologiefelder erfordern in frühen Phasen der Entstehung eine systematische Betrachtung von komplexen Abhängigkeiten zwischen Technologieprojekten und Marktanforderungen zur Priorisierung der Entwicklungstätigkeiten. Bestehende Ansätze können diesen Anforderungen jedoch nicht vollständig gerecht werden, da insbesondere dynamische Abhängigkeiten eingeschränkt berücksichtigt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird dieses Defizit aufgegriffen und ein integrativer Ansatz präsentiert, der auf den Grundlagen der Wechselwirkungsanalyse aufbaut. Die Adaption von Ansätzen der Graphentheorie auf die Wechselwirkungsanalyse erweitert den Einsatzbereich und ermöglicht die Darstellung komplexer dynamischer Zusammenhänge innerhalb von volatilen Technologiefeldern. Der Ansatz beinhaltet ein strukturiertes Vorgehen zur Beschreibung und Analyse von Wirkbeziehungen zwischen externen Anforderungen aus dem Unternehmensumfeld und unternehmensinternen Technologiepotenzialen. So wird es möglich, Fragestellungen der strategischen Technologieplanung gesamtheitlich zu beantworten und das Technologiemanagement bei der Ausrichtung von Technologiefeldern an der Unternehmensstrategie zu unterstützen.

In Kapitel 2 werden zu Beginn der Arbeit die aktuellen Entwicklungen im Bereich automatisierter Fahrfunktionen beschrieben und die Motivation für das Technologiefeld der Automotive Service Robotics dargelegt. Das Technologiefeld beschäftigt sich mit der Automatisierung von fahrzeugbezogenen Servicetätigkeiten und adressiert neue Bedarfe durch automatisierte Fahrfunktionen.

Die limitierten Einsatzbereiche der Robotersysteme ermöglichen eine Einordnung in den Themenkomplex der Robotik. Eine Abgrenzung zur bestehenden Kategorie der Serviceroboter wird durch die Zielsetzung der Applikationen ermöglicht. Verschiedene Beispielanwendungen aus der Praxis verdeutlichen die bestehenden Einsatzpotenziale im Kontext automatisierter Fahrfunktionen. Die aktuellen Herausforderungen des Technologiefelds erfordern jedoch eine methodische Herangehensweise für die Priorisierung von Entwicklungstätigkeiten. Diese Problemstellung kann in die Unternehmensfunktion des Technologiemanagements eingeordnet werden.

Im Hinblick auf die in Kapitel 2 beschriebenen Problemstellungen und Anforderungen werden in Kapitel 3 zunächst das Technologiemanagement als Unternehmensfunktion beschrieben und relevante Begrifflichkeiten definiert. Hierbei grenzt sich das Technologiemanagement von Innovations- und F&E-Management durch die verfolgten Aufgaben und Ziele ab. Die Zielstellung der Methodenentwicklung kann durch einen Abgleich der Herausforderungen aus Kapitel 2 mit bestehenden klassischen Methoden und ausgewählten Ansätzen der Forschung konkretisiert und in die Unternehmensfunktion der strategische Technologieplanung eingeordnet werden. Die Entwicklung eines integrativen Methodenansatzes durch Kombination von Wechselwirkungsanalyse und Technologieroadmapping verspricht das Potenzial, den Bedarf nach einer methodischen Unterstützung der strategischen Technologieplanung in frühen Phasen zu decken.

In Kapitel 4 wird das Potenzial der Graphentheorie zur Anwendung in der strategischen Technologieplanung dargelegt, um die Synthese der beiden Ansätze zu ermöglichen. Die mathematischen Grundlagen der Graphentheorie und die Analyseansätze zur mikro-, meso- und makroskopischen Analyse von Problemstellungen bilden die Grundlage für einen neuartigen Methodenansatz. Insbesondere die Erweiterung der Wechselwirkungsanalyse durch Ansätze der Graphentheorie ermöglicht eine Kombination mit dem Ansatz des Technologieroadmappings.

Aus den Erkenntnissen über bestehende Ansätze aus Kapitel 3 und den Potenzialen der Graphentheorie aus Kapitel 4 wird in Kapitel 5 ein eigener Methodenansatz zur Unterstützung der strategischen Technologieplanung in komplexen Technologiefeldern entwickelt. Der entwickelte Ansatz besteht aus den Phasen der *Informationsbeschaffungs-*, der *Informationsverarbeitungs-* und der *Informationsbewertungsphase*. Bei der *Informationsbeschaffungsphase* handelt es sich um ein dreistufiges Verfahren. In diesem Verfahren werden durch Kreativworkshops, Patent- und Literaturrecherchen potenzielle Anwendungsfelder und Produkte zukünftiger Technologien identifiziert und in Form von Steckbriefen durch *Szenarien*, als Beschreibung der exogenen Randbedingungen, und *Use Cases*, als Beschreibung eines möglichen Produkts in der Anwendung, charakterisiert. Die Dokumentation umfasst die Beschreibung technischer und monetärer Randbedingungen sowie technologischer Reifegrade in zeitlicher Abhängigkeit. Im zweiten Schritt wird eine *Funktionsbeschreibung* abgeleitet, um eine lösungsneutrale Beschreibung der Anwendung zu erhalten. Den letzten Schritt bildet die Identifikation von *Technologien*, die potenziell für die Realisierung der Funktionen geeignet sowie bestehender *Konzepte*, die für die Umsetzung der Anwendung bereits verfügbar sind.

Die *Informationsverarbeitungsphase* baut auf diesen Ergebnissen auf und überführt die Informationen in einen *Technologiefeldgraphen*. Die Informationen der Steckbriefe werden auf Grundlage eines Datenschemas in eine einheitliche Beschreibungsform überführt und für die Darstellung als Property-Graph vorbereitet. Durch die Anwendung eines *Relationsmodells* werden im nächsten Schritt die Abhängigkeitsverhältnisse zwischen den Knotenelementen des Technologiefeldgraphen definiert. Als Ergebnis wird ein Graph erzeugt, der mit den Knotenattributen technologische

Anforderungen und Leistungsparameter für die Elemente eines Technologiefelds repräsentiert und durch die Kanten die Abhängigkeitsverhältnisse beschreibt.

Mit der *Informationsbewertungsphase* folgt die graphentheoretischen Analyse des Technologiefeldgraphen und die Ableitung von Handlungsempfehlungen im Sinne der strategischen Technologieplanung. Auf Grundlage der Knotenattribute wird die *Realisierbarkeit* und die *Wirtschaftlichkeit* von Szenarien und Use Cases bewertet. Die Betrachtung erfolgt dynamisch auf Grundlage von zeitdiskreten Kennwerten. Kann die Realisierung technischer oder monetärer Anforderungen nicht gewährleistet werden, wird ein entsprechender *Handlungsbedarf* abgeleitet. Um diesen Handlungsbedarf zu gewichten, wird weiterhin die *Relevanz* und *Abhängigkeit* der Knotenelemente bestimmt. Diese Kennwerte quantifizieren die Bedeutung einzelner Knotenelemente für das Technologiefeld und beruhen auf einer Bewertung der Szenarien im Sinne der Technologie- und Unternehmensstrategie. Aus der Kombination von Relevanz und Abhängigkeit wird abschließend eine Priorisierung des Handlungsbedarfs vorgenommen und die Visualisierung der Ergebnisse in einer Graphendarstellung vorgenommen. Um weitergehend die Kompensation des Handlungsbedarfs zu dokumentieren, wird eine Technologieroadmap erstellt, die zukünftig benötigte Technologieentwicklungen mit den Produkt- und Marktentwicklungen verknüpft. Die hierarchische Struktur unterstützt den Aufbau der Roadmap und ermöglicht eine systematische Überführung in eine Prozessdarstellung.

Um den entwickelten Methodenansatz zu validieren, wird in Kapitel 6 der Methodenansatz exemplarisch auf das Technologiefeld Automotive Service Robotics angewendet. Dies ermöglicht die Identifikation strategisch relevanter Handlungsbedarfe in der Technologieentwicklung. In der exemplarischen Anwendung lässt sich die Technologie der *optischen Mustererkennung* als Schlüsseltechnologie mit einem Handlungsbedarf durch den Technologiefeldgraphen identifizieren und entsprechend der Anforderungen weiterentwickeln. Ferner werden konzeptionelle Handlungsbedarfe identifiziert, die durch eine Konzeptentwicklung adressiert sind. Die Ergebnisse der Entwicklungstätigkeiten lassen sich in den Technologiefeldgraphen zurückführen, und dokumentieren die Evolution des Technologiefelds.

Anhand der Erkenntnisse aus der Anwendung wurde in Kapitel 7 abschließend die Anwendbarkeit und der Mehrwert des Methodenansatzes diskutiert. Hierbei konnte nachgewiesen werden, dass der entwickelte Methodenansatz den Anforderungen der Zielstellung gerecht wird. Durch die Erweiterung der Wechselwirkungsanalyse mit Ansätzen der Graphentheorie wird ein integrativer Ansatz geschaffen, der das Technologiemanagement in einer frühen Phase bei der Priorisierung von Entwicklungsaktivität unterstützt. Der Ansatz ermöglicht es, komplexe Abhängigkeiten systematisch zu identifizieren, zu bewerten und die entsprechenden Handlungsempfehlungen abzuleiten. Durch die Verwendung eines dynamischen Bewertungsmodell wird zudem die Abbildung zeitabhängiger Entwicklungsaktivitäten realisiert. Die Schnittstelle zum Technologieroadmapping ermöglicht die Überführung der Ergebnisse in die operativen Bereiche des Technologiemanagements. Der vorgestellte Methodenansatz genügt somit den in Kapitel 1 definierten Anforderungen für die Unterstützung der strategischen Technologieplanung in frühen Phasen, insbesondere in der Technologieauswahl und der Synchronisierung. Mit dem entwickelten Methodenansatz wird die Lücke zwischen bestehenden Ansätzen der strategischen Technologieplanung geschlossen, ein integratives Werkzeug für die industrielle Anwendung geschaffen sowie ein effizientes und zielgerichtetes Technologiemanagement ermöglicht.

## 8.2 Ausblick

Um einen Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten und Anregungen für die Weiterentwicklung des vorgestellten Methodenansatzes zu geben, werden in diesem Abschnitt zum einen die Fortsetzungsoptionen auf methodischer Seite dargestellt. Darüber hinaus werden auch die weiteren Potenziale und Herausforderungen innerhalb des Technologiefelds Automotive Service Robotics beschrieben.

**Methodenansatz** Da der Methodenansatz darauf abzielt, die Informationen unterschiedlicher Informationsquellen miteinander zu synchronisieren (vgl. Abschnitt 5.2), ist die im Rahmen der Validierung geschaffene Umsetzung des Ansatzes in Form einer Toolchain lediglich für eine erste Validierung zielführend. In der weiteren Entwicklung ist es sinnvoll, dass ein integratives Softwarewerkzeug geschaffen wird, das auf die Verwendung durch unterschiedliche Zielgruppen ausgerichtet ist und adressatenspezifische Möglichkeiten zur Informationsbeschaffung und -analyse bereitstellt. So kann beispielsweise die Umsetzung als webbasiertes Werkzeug zu einer gesteigerten Akzeptanz bei Zielgruppen führen und die Phasen des Methodenansatzes unterstützen. In der Informationsbeschaffungsphase können die Steckbriefe für Szenarien, Use Cases, Funktionen, Technologien und Konzepte durch Eingabemasken ersetzt werden und so eine vereinfachte Erstellung des Technologiefeldgraphen erreicht werden. Die Informationsbewertungsphase ist in der aktuellen Ausführung durch eine Vielzahl von Bewertungsgrößen geprägt, die nur zum Teil eine direkte Relevanz für den Anwender haben. Durch die Umsetzung des Ansatzes als webbasiertes Werkzeug sind zielgruppenspezifische Bewertungsmasken zu schaffen, die lediglich entscheidungsrelevante Informationen bereitstellen. So können Technologieexperten Informationen über Anforderungen an die Technologieentwicklung als Ergebnis der Bewertung bereitgestellt werden, aber auch Anwendungsexperten mit Informationen über die Umsetzbarkeit von Szenarien und Use Cases bedient werden. Ferner bietet die Umsetzung als webbasiertes Werkzeug die Möglichkeit die Erweiterung des Technologiefeldgraphen in einen stetigen Prozess zu überführen.

Zur weiteren Validierung des Methodenansatzes ist es sinnvoll, den vorgestellten Ansatz auf andere Technologiefelder anzuwenden. Durch den lösungsneutralen Aufbau und die Berücksichtigung von allgemeingültigen Anforderungen im Rahmen von Abschnitt 2.4.1 ist der Ansatz grundsätzlich in der Lage, auch Problemstellungen außerhalb des Themenkomplexes Automotive Service Robotics zu bedienen. Die Anwendung auf weitere Technologiefelder kann sinnvolle Hinweise auf die Gültigkeit des Datenschemas und des Relationsmodells liefern. Weiterhin kann die langfristige Anwendung des Methodenansatzes zielführend sein. Im Rahmen der Ausführungen aus Kapitel 6 wird die strategische Technologieplanung in einem eingeschränkten Zeitraum unterstützt. Um jedoch den langfristigen Erfolg des Methodenansatzes nachzuweisen, gilt es, den Anwendungszeitraum zu erweitern und mit den klassischen Methodenansätzen zu vergleichen. Die Zuordnungen von Ressourcen im Rahmen der Roadmaperstellung muss zum aktuellen Zeitpunkt manuell erfolgen und wird in der Bewertung der Technologieprojekte nicht berücksichtigt. Da auch diese Kennwerte wichtige Bewertungsfaktoren darstellen, ist die Integration einer Ressourcenallokation in den Technologiefeldgraphen sinnvoll und kann zu einer vereinfachten Roadmaperstellung beitragen. Eine entsprechende Erweiterung des Relationsmodells kann hierzu zielführend sein.

Wie in Abschnitt 7.3 beschrieben, grenzt sich der Methodenansatz zu den angrenzenden Bereichen des Technologiemanagements in einer Vielzahl von Aufgaben ab. Die Verknüpfung des Methodenansatzes durch geeignete Schnittstellen zu den angrenzenden Bereichen eröffnet die Möglichkeit, einen ganzheitlichen Methodenansatz zu schaffen, der das Technologiemanagement in allen Phasen unterstützen kann. So kann beispielsweise eine entsprechend ausgestaltete Schnittstelle zur Technologiefrüherkennung die Informationsbeschaffungsphase beschleunigen, indem die Ergebnisse regelmäßiger Patentanalysen der Früherkennung automatisiert in den Technologiefeldgraphen einfließen. Dieser kann stetig aktualisiert und erweitert werden.

Das Relationsmodell des Methodenansatzes besitzt zum aktuellen Zeitpunkt eine hierarchische Struktur und ist nicht in der Lage, Relationen zwischen Knotenelementen innerhalb einer Ebene abzubilden. Somit ist es nicht möglich, die Beziehungen zwischen zwei Technologien zu beschreiben. Die Integration solcher Relationsarten bietet die Möglichkeit, den Anwender des Methodenansatzes während der Konzeptbildung zu unterstützen, indem der Technologiefeldgraph Informationen über Technologiealternativen zur Verfügung stellt.

Mit der Bestimmung von Relevanz und Abhängigkeit ist im Rahmen des Methodenansatzes eine systematische Bewertung der Bedeutung von einzelnen Technologieprojekten für die Entwicklung des übergeordneten Themenfelds möglich. Durch diesen Ansatz kann abgeschätzt werden, welche Folgen ein Scheitern einzelner Technologieprojekte nach sich zieht. Aktuell muss diese Abschätzung manuell erfolgen. Der Arbeitsaufwand steigt hierbei proportional mit der Komplexität des Technologiefelds. Eine mögliche Vereinfachung dieses Vorgehens stellt eine Sensitivitätsanalyse dar, in der die Empfindlichkeit der identifizierten Kennzahlen (z. B. Kosten oder Reifegrad) auf Änderungen der Eingangskenngrößen untersucht wird. So können im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse beispielsweise die Auswirkung von Änderungen in den Reifegradverläufen einzelner Technologien untersucht werden, und die Bewertung, über den Knotenausgangs- und Knoteneingangsgrad hinaus, erweitert werden. Ferner können durch eine Sensitivitätsanalyse die Auswirkungen positiver Entwicklungen analysiert werden und so beispielsweise bestimmt werden, welche Folgen die frühzeitige Fertigstellung eines Technologieprojekts hat. Geeignete Ansätze finden sich in der Investitionsrechnung aber auch der Mess- und Regelungstechnik, eine Anpassung auf den in dieser Arbeit gewählte graphentheoretischen Ansatz ist jedoch Voraussetzung für die Implementierung.

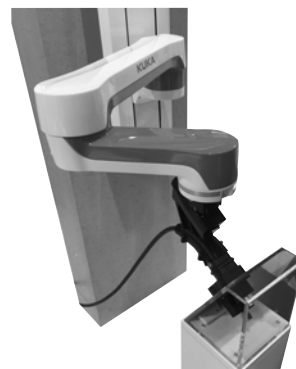
**Technologiefeld Automotive Service Robotics** Neben der Fortführung des Methodenansatzes verspricht auch das Themenfeld der Automotive Service Robotics weiteres Entwicklungspotenzial. In der Analyse des Technologiefelds hat sich gezeigt, dass eine Vielzahl von Funktionen eine direkte oder indirekte Interaktion von Fahrzeug und Automatisierungslösung voraussetzt und entsprechende Schnittstellen zwischen diesen Systemen benötigt werden. Dies gilt insbesondere für die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Roboter, da beispielsweise Betriebszustände abgefragt werden müssen. Darüber hinaus sind auch physische Schnittstellen von Bedeutung. So stellt das Öffnen von Türen, Klappen oder Deckeln als Funktion die Automatisierungslösungen vor große Herausforderungen und setzt entsprechenden Greifmechanismen voraus. Eine Verlagerung dieser Funktion auf das Fahrzeug kann daher zu einer Komplexitätsreduktion auf Seiten der Automatisierungslösung führen. Eine frühzeitige Integration dieser Fahrzeugschnittstellen ist zielführend, um die Entwicklung des Technologiefelds Automotive Service Robotics voranzutreiben.



Die Weiterentwicklung des Technologiefelds im Rahmen von Kapitel 6 zeigt, dass der technologische und konzeptionelle Handlungsbedarf adressiert wird. Jedoch besteht weiterhin für die Funktion der *Personensicherheit im öffentlichen Raum* ein Handlungsbedarf, da die technologischen und insbesondere rechtlichen Rahmenbedingungen für eine Umsetzung aktuell nicht gegeben sind. Durch die Industrienormen [33, 34, 70] bzw. die Richtlinien der DEUTSCHEN GESETZLICHEN UNFALLVERSICHERUNG (DGUV) [27, 28] sind Rahmenbedingungen für einen Betrieb ohne trennende Schutzeinrichtungen definiert, jedoch beschränken sich diese auf die Anwendung in industriellen Umfeldern. Die aktuell betrachteten Szenarien des Technologiefelds Automotive Service Robotics zeigen jedoch, dass der Haupteinsatzbereich vermutlich im öffentlichen Raum liegen wird. Entsprechend gilt es, neue Richtlinien für den Betrieb von Robotiklösungen im öffentlichen Raum zu entwickeln.



(a) Kinematik in der Wandmontage



(b) Kinematik im gesteckten Zustand

**Abbildung 8.1:** KUKA Ladeassistent

Durch das Technologiefeld der Automotive Service Robotics besteht großes Potenzial, die Automatisierung von Fahrfunktionen zu unterstützen und Mobilitätssysteme wirtschaftlich zu gestalten. Erste Roboterhersteller haben dieses Potenzial erkannt. So präsentiert Roboterhersteller KUKA ein eigenes Konzept des Laderoboters für Privatgaragen. Dieses Konzept ist in Abbildung 8.1 dargestellt. Hierbei verlassen die Roboterhersteller ihre Kernbereiche und stoßen in den Bereich der Consumerrobotik vor. Dieser ist geprägt durch einen hohen Kosten- und Innovationsdruck, sodass zukünftig auch neue Herausforderungen für etablierte Roboterhersteller resultieren. Die Erforschung neuer Ansätze zur Kostenreduktion in der Robotik, wie beispielsweise die Softrobotik, sollte deshalb intensiv vorangetrieben werden.

# Literaturverzeichnis

- [1] Abele, T.: *Verfahren für das Technologie-Roadmapping zur Unterstützung des strategischen Technologiemanagements*. Dissertationsschrift, Universität Stuttgart, Jost-Jetter Verlag, Heimsheim, 2006.
- [2] Abolhassan, F.: Einleitung. In: Abolhassan, F. und Kellermann, J. (Hrsg.): *Effizienz durch Automatisierung: Das „Zero Touch“-Prinzip im IT-Betrieb*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2016.
- [3] Ajoudani, A.; Zanchettin, A. M.; Ivaldi, S.; Albu-Schäffer, A.; Kosuge, K. und Khatib, O.: Progress and prospects of the human–robot collaboration. In: *Autonomous Robots*, 42, 5, S. 957–975, 2018.
- [4] Andrews, M. K.; Thompson, C.; Warner, E. und Jouaneh, M.: Robotic fueling system. In: *2008 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications*. 2008.
- [5] Arnold, A. und Piontek, F. M.: Zentrale Begriffe im Kontext der Reallaborforschung. In: Di Giulio, A. und Defila, R. (Hrsg.): *Transdisziplinär und transformativ forschen: Eine Methodensammlung*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2018.
- [6] Bastian, M.; Heymann, S. und Jacomy, M.: Gephi: An Open Source Software for Exploring and Manipulating Networks. Online Veröffentlichung, 2009. URL <https://gephi.org/publications/gephi-bastian-feb09.pdf>. Zugriff: 17-04-2018.
- [7] Beiker, S. A.: Einführungsszenarien für höhergradig automatisierte Straßenfahrzeuge. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B. und Winner, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [8] Berger, A.; Grimmer, M. und Müller-Hannemann, M.: Fully Dynamic Speed-Up Techniques for Multi-criteria Shortest Path Searches in Time-Dependent Networks. In: Festa, P. (Hrsg.): *Experimental Algorithms*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [9] Berntsen, G.: *Ein wissensbasiertes Fuzzy-System zur Entscheidungsunterstützung innerhalb des Technologiefrühaufklärungsprozesses*. Dissertationsschrift, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, 2015.
- [10] Binder, V. A. und Kantowsky, J.: *Technologiepotentiale: Neuausrichtung der Gestaltungsfelder des Strategischen Technologiemanagements*. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, 1996.
- [11] Bösch, P. M.; Becker, F.; Becker, H. und Axhausen, K. W.: Cost-based analysis of autonomous mobility services. In: *Transport Policy*, 64, S. 76–91, 2018.
- [12] Bosler, M.; Burr, W. und Ihring, L.: Vernetzte Fahrzeuge-empirische Analyse digitaler Geschäftsmodelle für Connected-Car-Services. In: *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, 55, 2, S. 329–348, 2018.

- [13] Braess, H.-H. und Seiffert, U.: Produktentstehungsprozess. In: Braess, H.-H. und Seiffert, U. (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik 7. Auflage*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012.
- [14] Brandt, C.: Unbemannte Luftfahrtsysteme in Deutschland–rechtlich gesehen. In: DVW – Gesellschaft für Geodäsie, G. u. L. e. V. (Hrsg.): *UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen-Beiträge zum 169. DVW-Seminar am 19. und 20. Februar 2018 in Hamburg*. Wißner-Verlag, Wiesbaden, 2018.
- [15] Brockhoff, K.: *Produktpolitik*. UTB Verlag, Stuttgart, 1999.
- [16] Brockhoff, K. und Witte, E.: Technologiemanagement: das S-Kurven-Konzept. In: Hauschildt, J. und Grün, O. (Hrsg.): *Ergebnisse empirischer betriebswirtschaftlicher Forschung*. Festschrift für Eberhard Witte, Stuttgart, 1993.
- [17] Brodbeck, H.: *Strategische Entscheidungen im Technologie-Management: Relevanz und Ausgestaltung in der unternehmerischen Praxis*. Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 2. Auflage, 1999.
- [18] Bucher, P. E.: *Integrated technology roadmapping: design and implementation for technology-based multinational enterprises*. Dissertationsschrift, ETH Zürich, Zürich, 2003.
- [19] Bullinger, H.-J.: Was ist Technikfolgenabschätzung? In: Bullinger, H.-J. (Hrsg.): *Technikfolgenabschätzung (TA)*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1994.
- [20] Chalmers University of Technology: The refuse-collecting robot has been successfully tested. Online Pressemitteilung, Februar 2016. URL <https://www.chalmers.se/en/departments/e2/news/Pages/The-refuse-collecting-robot-has-been-successfully-tested.aspx>. Zugriff: 20-12-2018.
- [21] Chen, T. D.; Kockelman, K. M. und Hanna, J. P.: Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: implications of vehicle & charging infrastructure decisions. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 94, S. 243–254, 2016.
- [22] Ciupe, V. und Maniu, I.: New Trends in Service Robotics. In: Pisla, D.; Bleuler, H.; Rodic, A.; Vaida, C. und Pisla, A. (Hrsg.): *New Trends in Medical and Service Robots: Theory and Integrated Applications*. Springer International Publishing, Cham, 2014.
- [23] Daim, T. U.; Yoon, B.-S.; Lindenberg, J.; Grizzi, R.; Estep, J. und Oliver, T.: Strategic roadmapping of robotics technologies for the power industry: A multicriteria technology assessment. In: *Technological Forecasting and Social Change*, 131, S. 49–66, 2018.
- [24] Daimler AG: Vorrichtung zum Reinigen eines Kraftwagens. Erfinder: Siegel, T. Oktober 2011. Anmeldedatum: Februar 2011. Patentschrift DE 102011010205 A1.
- [25] Daimler AG: Automatisches Reinigungsgerät für einen Innenraum eines Kraftwagens. Erfinder: Kronewitter, M. Februar 2017. Anmeldedatum: August 2016. Patentschrift DE 102016009585 A1.

- [26] Derendarz, W.; Iser, R.; Muehlfellner, P.; Wonneberger, S.; Nguyen, T. N.; Brosig, S.; Effertz, J.; Mielenz, H.; Mimura, K.; Beermann, M.; Schwesinger, U.; Rufli, M.; Furgale, P.; Timpner, J.; Rottmann, S.; Wolf, L.; Häne, C.; Heng, L.; Lee, G.; Pollefeys, M.; Grimmet, H.; Triebel, R.; Posner, I.; Newman, P.; Cardarelli, E.; Cattani, S.; Bertozzi, M.; Brüning, S.; Horstmann, S.; Stellmacher, M. und Siegwart, R.: Vollautomatisches Laden und Fahren auf öffentlichen Parkplätzen. In: *Internationaler Kongress Elektronik im Fahrzeug*, VDI-Berichte 2188. VDI Wissensforum GmbH, Baden-Baden, 2013.
- [27] DGUV-Information 209-074: *Industrieroboter*. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V., 2015.
- [28] DGUV-Information FB HM-080: *Kollaborierende Robotersysteme: Planung von Anlagen mit Funktion „Leistungs- und Kraftbegrenzung“*. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V., 2017.
- [29] Diestel, R.: *Graphentheorie*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 2. Auflage, 2000.
- [30] Dikmen, M. und Burns, C.: Trust in autonomous vehicles: The case of Tesla Autopilot and Summon. In: *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. 2017.
- [31] DIN CEN/TS 16555-1: *Innovationsmanagement-Teil 1: Innovationsmanagementsysteme*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2013.
- [32] DIN EN 60529: *Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code)*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2014.
- [33] DIN EN ISO 10218-1: *Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen-Teil 1: Roboter*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2012.
- [34] DIN EN ISO 10218-2: *Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen-Teil 2: Robotersysteme und Integration*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2012.
- [35] DIN EN ISO 12100: *Sicherheit von Maschinen-Allgemeine Gestaltungsgrundsätze - Risiko-bewertung und Risikominderung*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2011.
- [36] DIN EN ISO 13842: *Roboter und Robotikgeräte-Sicherheitsanforderungen für persönliche Assistenzroboter*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2014.
- [37] DIN ISO 16290: *Raumfahrtssysteme - Definition des Technologie-Reifegrades (TRL) und der Beurteilungskriterien*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2016.
- [38] Disselkamp, M.: *Innovationsmanagement: Instrumente und Methoden zur Umsetzung im Unternehmen*. Springer, Wiesbaden, 2. Auflage, 2012.
- [39] Domschke, W.; Drexel, A.; Klein, R. und Scholl, A.: Graphentheorie. In: Domschke, W.; Drexel, A.; Klein, R. und Scholl, A. (Hrsg.): *Einführung in Operations Research*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [40] Dowling, M. und Hüsing, S.: Technologiestrategie. In: Specht, M. G. Dieter und Möhrle (Hrsg.): *Handbuch Technologiemanagement*. Gabler, Wiesbaden, 2002.

- [41] Ehrlenspiel, K. und Meerkamm, H.: *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeinsatz, Zusammenarbeit*. Hanser Verlag, München, 5. Auflage, 2013.
- [42] Eversheim, W.: Unternehmensfunktionen. In: *Organisation in der Produktionstechnik: Band 1: Grundlagen*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1996.
- [43] Fallböhrmer, M.: *Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung*. Dissertationsschrift, Technische Hochschule Aachen, Shaker, Aachen, 2000.
- [44] Feldhusen, J. und Grote, K.-H.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. Springer Vieweg, Berlin, 8. Auflage, 2013.
- [45] Fiebig, C.: *Synchronisation von Fabrik- und Technologieplanung*. Fortschritt-Berichte VDI / 16: Technik und Wirtschaft. VDI-Verlag, 2004.
- [46] Flämig, H.: Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren im Bereich des Gütertransportes. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B. und Winner, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [47] Fondahl, K.; Herold, S.; Daryan, B. und Schütz, D.: Automation beyond Self-Driving - The Role of Automotive Service Robots for Automated Mobility Systems. In: *Automotive meets Electronics, Beiträge der 8. GMM-Fachtagung 7.-8. März 2017 in Dortmund*. VDE Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, 2017.
- [48] Fraunfelder, P.: *Einführung eines Wertorientierten Strategischen Technologiemanagements*. Dissertationsschrift, ETH Zürich, Zürich, 1998.
- [49] Friedrich, B.: Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B. und Winner, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [50] Frindt, M.; Krefft, M. und Hesselbach, J.: Structure and Type Synthesis of Parallel Manipulators. In: Schütz, D. und Wahl, F. M. (Hrsg.): *Robotic Systems for Handling and Assembly*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [51] Furgale, P.; Schwesinger, U.; Rufli, M.; Derendarz, W.; Grimmer, H.; Mühlhoffner, P.; Wonneberger, S.; Timpner, J.; Rottmann, S.; Li, B.; Schmidt, B.; Nguyen, T. N.; Cardarelli, E.; Cattani, S.; Brüning, S.; Horstmann, S.; Stellmacher, M.; Mielenz, H.; Köser, K.; Beermann, M.; Häne, C.; Heng, L.; Lee, G. H.; Fraundorfer, F.; Iser, R.; Triebel, R.; Posner, I.; Newman, P.; Wolf, L.; Pollefeys, M.; Brosig, S.; Effertz, J.; Pradalier, C. und Siegwart, R.: Toward automated driving in cities using close-to-market sensors: An overview of the V-Charge Project. In: *2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. 2013.
- [52] Gasser, T. M.: Grundlegende und spezielle Rechtsfragen für autonome Fahrzeuge. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B. und Winner, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [53] Gausemeier, J.; Ebbesmeyer, P. und Kallmeyer, F.: *Produktinnovation: strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen*. Hanser Verlag, München, Wien, 2001.

- [54] Geldermann, J. und Rentz, O.: Entwicklung eines multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssystems zur integrierten Technikbewertung. In: Fleischmann, B. (Hrsg.): *Operations research proceedings 2000-Selected papers of the Symposium on operations research (OR 2000), Dresden, 9-12 September 2000*. Springer, Berlin, 2001.
- [55] Gerpott, T. J.: *Strategisches Technologie- und Innovationsmanagement*. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2. Auflage, 2013.
- [56] Geschka, H.; Schauffele, J. und Zimmer, C.: Explorative Technologie-Roadmaps-Eine Methodik zur Erkundung technologischer Entwicklungslinien und Potenziale. In: Möhrle, M. G. und Isenmann, R. (Hrsg.): *Technologie-Roadmapping: Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [57] Goll, J.: *Entwurfsprinzipien und Konstruktionskonzepte der Softwaretechnik: Strategien für schwach gekoppelte, korrekte und stabile Software*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018.
- [58] Gomeringer, A.: *Eine integrative, prognosebasierte Vorgehensweise zur strategischen Technologieplanung für Produkte*. Dissertationsschrift, Universität Stuttgart, Jost-Jetter Verlag, Heimsheim, 2007.
- [59] Google Inc.: Passive wiper system. Erfinder: Doorley, G.; Karplus, P. T. H. und Avram, P. Mai 2016. Anmeldedatum: Oktober 2014. Patentschrift US 2016/0121855 A1.
- [60] Haag, C.; Schuh, G.; Kreysa, J. und Schmelter, K.: Technologiebewertung. In: *Technologiemanagement: Handbuch Produktion und Management 2*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [61] Harary, F. und Gupta, G.: Dynamic graph models. In: *Mathematical and Computer Modelling*, 25, 7, S. 79–87, 1997.
- [62] Heesen, M.: *Innovationsportfoliomanagement : Bewertung von Innovationsprojekten in kleinen und mittelgroßen Unternehmen der Automobilzulieferindustrie*. Dissertationsschrift, Universität Duisburg-Essen, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2009.
- [63] Helbig, M.: *Innovative Reinigungskonzepte für fahrerlose Fahrzeuge basierend auf RPAS*. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Abschlussarbeit, auf Anfrage einsehbar, 2018.
- [64] Hey, T.: *Die außervertragliche Haftung des Herstellers autonomer Fahrzeuge bei Unfällen im Straßenverkehr*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2019.
- [65] Heymann, S.; Bastian, M.; Jacomy, M.; Maussang, C.; Rohmer, A.; Bilcke, J. und Jacomy, A.: GEXF File Format. Online Veröffentlichung, Januar 2019. URL <https://gephi.org/gexf/format/index.html>. Zugriff: 12-02-2019.
- [66] Iglinski, H. und Babiak, M.: Analysis of the Potential of Autonomous Vehicles in Reducing the Emissions of Greenhouse Gases in Road Transport. In: *Procedia Engineering*, 192, S. 353–358, 2017.
- [67] International Federation of Robotics: *World Robotics 2017-Industrial Robots*. VDMA, 2017.

- [68] International Federation of Robotics: *World Robotics 2017-Service Robots*. VDMA, 2017.
- [69] ISO 8373: *Roboter und Robotikgeräte-Wörterbuch*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2012.
- [70] ISO TS 15066: *Robots and robotic devices-Collaborative robots*. ISO International Organization for Standardization, 2016.
- [71] Jaeger, F.: Total Costs of Ownership (TCO). In: von Dobschütz, L.; Barth, M.; Jäger-Goy, H.; Kütz, M. und Möller, H.-P. (Hrsg.): *IV-Controlling: Konzepte-Umsetzungen-Erfahrungen*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2000.
- [72] Jahn, T.: *Portfolio- und Reifegradmanagement für Innovationsprojekte zur Multiprojektsteuerung in der frühen Phase der Produktentwicklung (575)*. Dissertationsschrift, Universität Stuttgart, 2010.
- [73] Jansen, D.: *Einführung in die Netzwerkanalyse: Grundlagen, Methoden, Forschungsbeispiele*. Leske + Budrich, Opladen, 2. Auflage, 2003.
- [74] Jühling, E.: *Technologiemanagement im Automotive After Sales Service*. Dissertationsschrift, Technische Universität Braunschweig, Vulkan-Verlag, Essen, 2011.
- [75] Kernhof, J.; Leuckfeld, J. und Tavano, G.: LiDAR-Sensorsystem für automatisiertes und autonomes Fahren. In: Tille, T. (Hrsg.): *Automobil-Sensorik 2: Systeme, Technologien und Applikationen*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2018.
- [76] Klappert, S.; Schuh, G.; Möller, H. und Nollau, S.: Technologieentwicklung. In: *Technologiemanagement: Handbuch Produktion und Management 2*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [77] Kleinberg, J. M.: Authoritative Sources in a Hyperlinked Environment. In: *J. ACM*, 46, 5, S. 604–632, 1999.
- [78] Kleuker, S.: NoSQL mit MongoDB und Java. In: *Grundkurs Datenbankentwicklung: Von der Anforderungsanalyse zur komplexen Datenbankanfrage*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2016.
- [79] Knoll, P.: Sensorik für Fahrzeugrundumsicht. In: Reif, K. (Hrsg.): *Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2010.
- [80] Knoll, P.: Einparksysteme. In: Reif, K. (Hrsg.): *Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2010.
- [81] Kobourov, S. G.: Spring Embedders and Force Directed Graph Drawing Algorithms. Online Veröffentlichung, 2012. URL <http://arxiv.org/abs/1201.3011>. Zugriff: 12-10-2018.
- [82] Kral, W. und Dalpez, S.: Modular Sensor Cleaning System for Autonomous Driving. In: *ATZ worldwide*, 120, 11, S. 56–59, 2018.
- [83] Krishcke, A. und Röpcke, H.: *Graphen und Netzwerktheorie: Grundlagen-Methoden-Anwendungen*. Hanser, München, 2014.

- [84] Kröll, M.: *Methode zur Technologiebewertung für eine ergebnisorientierte Produktentwicklung*. Dissertationsschrift, Universität Stuttgart, Jost-Jetter-Verlag, 2007.
- [85] Krystek, U.; Müller-Stewens, G. und Stewens, G. M.: *Frühaufklärung für Unternehmen: Identifikation und Handhabung zukünftiger Chancen und Bedrohungen*. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 1993.
- [86] KUKA AG: KUKA LBR iiwa. Online Produktbeschreibung. URL <https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/industrieroboter/lbr-iiwa>. Zugriff: 08-04-2019.
- [87] Landrock, H.: Gesetzeslage und Genehmigungen. In: *Die Industriedrohne-der fliegende Roboter: Professionelle Drohnen und ihre Anwendung in der Industrie 4.0*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2018.
- [88] Langenberg, J.; Bartels, A. und Etemad, A.: Challenges for Automated Driving on Motorways. In: *24. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*. Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen (fka), Aachen, 2015.
- [89] Laube, T. und Abele, T.: Technologie-Roadmapping zur Planung und Steuerung der betrieblichen Forschung und Entwicklung. In: Möhrle, M. G. und Isenmann, R. (Hrsg.): *Technologie-Roadmapping: Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [90] Lee, H. und Geum, Y.: Development of the scenario-based technology roadmap considering layer heterogeneity: An approach using CIA and AHP. In: *Technological Forecasting and Social Change*, 117, S. 12–24, 2017.
- [91] Lee, S.; Yoon, B.; Lee, C. und Park, J.: Business planning based on technological capabilities: Patent analysis for technology-driven roadmapping. In: *Technological Forecasting and Social Change*, 76, 6, S. 769–786, 2009.
- [92] Lenz, B. und Fraedrich, E.: Neue Mobilitätskonzepte und autonomes Fahren: Potenziale der Veränderung. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B. und Winner, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [93] Lenz, B. und Fraedrich, E.: Vom (Mit-)Fahren: autonomes Fahren und Autonutzung. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B. und Winner, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [94] Lichtenthaler, E.: Methoden der Technologie-Früherkennung und Kriterien zu ihrer Auswahl. In: Möhrle, M. G. und Isenmann, R. (Hrsg.): *Technologie-Roadmapping: Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [95] Liebig, H.; Flik, T.; Rechenberg, P.; Reinefeld, A. und Mössenböck, H.: *Das Ingenieurwissen: Technische Informatik*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [96] Litman, T.: *Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning*. Victoria Transport Policy Institute, 2015.



- [97] Litman, T.: *Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning*. Victoria Transport Policy Institute, 2018.
- [98] Little, A. D.: *Management erfolgreicher Produkte*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 1994.
- [99] Liu, J.; Sun, Q.; Fan, Z. und Jia, Y.: TOF Lidar Development in Autonomous Vehicle. In: *2018 IEEE 3rd Optoelectronics Global Conference (OGC)*. 2018.
- [100] Mankins, J. C.: Technology Readiness Levels. Online Veröffentlichung, April 1995. URL [http://www.artemisinnovation.com/images/TRL\\_White\\_Paper\\_2004-Edited.pdf](http://www.artemisinnovation.com/images/TRL_White_Paper_2004-Edited.pdf). Zugriff: 10-06-2017.
- [101] Maracke, C.: Autonomes Fahren-ein Einblick in die rechtlichen Rahmenbedingungen. In: *Wirtschaftsinformatik & Management*, 9, 3, S. 62–68, 2017.
- [102] Matthias, B. und Ding, H.: Safe Human-Robot Collaboration Combines Expertise and Precision in Manufacturing. In: *atp edition*, 55, 10, S. 22–25, 2013.
- [103] Matyas, M. und Kamargianni, M.: The potential of mobility as a service bundles as a mobility management tool. In: *Transportation*, 2018.
- [104] Max, S.; Brosig, S.; Ortmann, S. und Katzwinkel, R.: Trainiertes fernbedientes Parken. Auf dem Weg zum vollautomatisierten Parken. In: *LIV 2015, 17th International Congress Electronics in Vehicles*. VDI-Verlag, 2015.
- [105] Meier, A.: Der Weg zum Datenmanagement. In: *Relationale und postrelationale Datenbanken*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [106] Mieke, C.: *Technologiefrühaufklärung in Netzwerken*. Dissertationsschrift, Technische Universität Cottbus, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2006.
- [107] Miseikis, J.; Rüther, M.; Walzel, B.; Hirz, M. und Brunner, H.: 3D Vision Guided Robotic Charging Station for Electric and Plug-in Hybrid Vehicles. In: *OAGM/AAPR & ARW Joint Workshop 2017*, Wien, Österreich, 2017.
- [108] Möhrle, M. G.: Instrumentelles FuE-Programm-Management - Das Zusammenspiel von FuE-Programm-Portfolio und FuE-Projektverflechtungsgraphen. In: Zahn, E. (Hrsg.): *Technologiemanagement und Technologien für das Management*. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1994.
- [109] MOIA: Startschuss für Ridesharing in Hannover: MOIA überführt Testservice in den öffentlichen Betrieb. Online Pressemitteilung, Juli 2018. URL [https://dslh0kikei2uz.cloudfront.net/fileadmin/user\\_upload/content/press/2018\\_07/download/2018.07.30\\_Hannover\\_0Effentlicher\\_Betrieb.pdf](https://dslh0kikei2uz.cloudfront.net/fileadmin/user_upload/content/press/2018_07/download/2018.07.30_Hannover_0Effentlicher_Betrieb.pdf). Zugriff: 10-11-2018.
- [110] Müller-Stewens, G. und Lechner, C.: *Strategisches Management : wie strategische Initiativen zum Wandel führen ; der St. Galler General-Management-Navigator*. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 4. Auflage, 2011.
- [111] Nau, B.: *Anlauforientierte Technologieplanung zur Auswahl von Fertigungstechnologien*. Dissertationsschrift, Technische Hochschule Aachen, Apprimus-Verlag, Aachen, 2012.

- [112] Neemann, C. W. und Schuh, G.: Technologieschutz. In: *Technologiemanagement: Handbuch Produktion und Management 2*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [113] Newman, M. E.: Fast algorithm for detecting community structure in networks. In: *Physical Review*, 69(66133), 6, 2004.
- [114] NHTSA: *Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles*. National Highway Traffic Safety Administration, 2013.
- [115] Oberer-Treitz, S. und Matthias, B.: Potenziale der Mensch-Roboter-Kollaboration. In: *MM-Maschinenmarkt: Das Industriemagazin*, Ausgabe 123, Ausgabe . 2017.
- [116] Ocka, I.: Graphs and Hypergraphs in Cross-Impact Analysis. In: *IFAC Proceedings Volumes*, 19, 10, S. 427–434, 1986.
- [117] Othersen, I.: *Vom Fahrer zum Denker und Teilzeitlenker: Einflussfaktoren und Gestaltungsmerkmale nutzerorientierter Interaktionskonzepte für die Überwachungsaufgabe des Fahrers im teilautomatisierten Modus*. Springer, Wiesbaden, 2016.
- [118] Özgüner, Ü.; Stiller, C. und Redmill, K.: Systems for Safety and Autonomous Behavior in Cars: The DARPA Grand Challenge Experience. In: *Proceedings of the IEEE*, 95, 2, S. 397–412, 2007.
- [119] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J. und Grote, K.-H.: *Konstruktionslehre : Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung ; Methoden und Anwendung*. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin u.a., 7. Auflage, 2007.
- [120] Pavone, M.: Autonomous Mobility-on-Demand Systems for Future Urban Mobility. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B. und Winner, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [121] Perillieux, R.: *Der Zeitfaktor im strategischen Technologiemanagement: früher oder später Einstieg bei technischen Produktinnovationen?* Schmidt Verlag, Berlin, 1987.
- [122] Pfeiffer, W.: *Technologie-Portfolio zum Management strategischer Zukunftsgeschäftsfelder*. Innovative Unternehmensführung. Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen, 6. Auflage, 1992.
- [123] Pfeiffer, W. und Weiß, E.: Methoden zur Analyse und Bewertung technologischer Alternativen. In: Zahn, E. (Hrsg.): *Handbuch Technologiemanagement*. Schäffer-Pöschel Verlag, Stuttgart, 1995.
- [124] Phaal, R.; Farrukh, C. und Probert, D.: *T-Plan: The Fast-start to Technology Roadmapping: Planning Your Route to Success*. University of Cambridge, Institute for Manufacturing, 2001.
- [125] Phaal, R.; Farrukh, C. und Probert, D.: *Technology Roadmapping: Linking Technology Resources to Business Objectives*. University of Cambridge, 2001.
- [126] Phaal, R.; Farrukh, C. J. und Probert, D. R.: Technology roadmapping-A planning framework for evolution and revolution. In: *Technological Forecasting and Social Change*, 71, 1, S. 5–26, 2004.

- [127] Pipp, T.; Reiners, P.-A. und von Roesgen, J.: Driverless Vehicles: Stand der Technik und Anwendung am Fallbeispiel Flughafen. In: Wagner, H. und Kabel, S. (Hrsg.): *Mobilität 4.0 – neue Geschäftsmodelle für Produkt- und Dienstleistungsinnovationen*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2018.
- [128] Reif, K.: Adaptive Cruise Control (ACC). In: Reif, K. (Hrsg.): *Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2010.
- [129] Robinson, I.; Webber, J. und Eifrem, E.: *Graph Databases*. O'Reilly Media, New York, 2015.
- [130] Rodriguez, M. A.: Mapping Semantic Networks to Undirected Networks. In: *International Journal of Applied Mathematics and Computer Sciences*, 5, 1, S. 39–42, 2008.
- [131] Rodriguez, M. A. und Neubauer, P.: Constructions from Dots and Lines. In: *Bulletin of the American Society for Information Science and Technology*, 2010.
- [132] Roland, L.: The Manta and the Kanuk: Novel 4-DOF Parallel Mechanisms for Industrial Handling. In: *Proceedings ASME Dynamic Systems and Control Division, IMECE 1999 Konferenz*, 67, S. 831–844, 1999.
- [133] Rooch, A.: Grundlagen der Statistik. In: *Statistik für Ingenieure: Wahrscheinlichkeitsrechnung und Datenauswertung endlich verständlich*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [134] Ropohl, G.: *Allgemeine Technologie: eine Systemtheorie der Technik*. Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, 4. Auflage, 2009.
- [135] Rosier, C.: *Zentrale Technologieentwicklung in diversifizierten Unternehmen*. Dissertationsschrift, Technische Hochschule Aachen, Shaker Verlag, Aachen, 2006.
- [136] Rotec Engineering B.V.: Robotic Fueling System. Online Produktbeschreibung. URL <http://rotec-engineering.nl/en/automation/refueling-robot/>. Zugriff: 11-11-2018.
- [137] Rotec Engineering B.V.: Refueling nozzle and automatic refueling system using the same. Erfinder: Hofman, H.; Koekoek, M.; Van der Zee, T. W. und Groensma, Y. Dezember 2010. Anmeldedatum: Oktober 2007. Patentschrift EP 2 053 015 B1.
- [138] Roth, K.: Methodisches Ermitteln der Funktionen und der Funktionsstrukturen. In: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Band 1: Konstruktionslehre*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2000.
- [139] Rübbelke, R.: *Systematik zur innovationsorientierten Kompetenzplanung*. Dissertation, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Paderborn, 2016.
- [140] Saaty, T. L.: How to make a decision: The analytic hierarchy process. In: *European Journal of Operational Research*, 48, 1, S. 9–26, 1990.
- [141] SAE International: *J3016-Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*. Society of Automotive Engineers, 2016.
- [142] Schaerer, D.: Graphen. In: *Listen, Bäume und Graphen als Objekte: Mit Beispielen in Object Pascal*. Springer, Wien, 1994.

- [143] Schawel, C. und Billing, F.: Brainstorming. In: *Top 100 Management Tools: Das wichtigste Buch eines Managers*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2009.
- [144] Schawel, C. und Billing, F.: SWOT-Analyse. In: *Top 100 Management Tools: Das wichtigste Buch eines Managers*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2011.
- [145] Schawel, C. und Billing, F.: Walt-Disney-Methode. In: *Top 100 Management Tools: Das wichtigste Buch eines Managers Von ABC-Analyse bis Zielvereinbarung*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2012.
- [146] Schindler, S.: *Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion*. Dissertationsschrift, Universität München, Utz Verlag, München, 2015.
- [147] Schneidewind, U. und Scheck, H.: Die Stadt als „Reallabor“ für Systeminnovationen. In: Rückert-John, J. (Hrsg.): *Soziale Innovation und Nachhaltigkeit: Perspektiven sozialen Wandels*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2013.
- [148] Schubert, M.: Kürzeste Wege und der Algorithmus von Dijkstra. In: *Mathematik für Informatiker: Ausführlich erklärt mit vielen Programmbeispielen und Aufgaben*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2009.
- [149] Schuh, G.; Drescher, T.; Beckermann, S. und Schmelter, K.: Technologieverwertung. In: *Technologiemanagement: Handbuch Produktion und Management 2*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [150] Schuh, G.; Klappert, S. und Moll, T.: Ordnungsrahmen Technologiemanagement. In: *Technologiemanagement: Handbuch Produktion und Management 2*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [151] Schuh, G.; Klappert, S. und Orilski, S.: Technologieplanung. In: *Technologiemanagement: Handbuch Produktion und Management 2*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [152] Schuh, G.; Klappert, S.; Schubert, J. und Nollau, S.: Grundlagen zum Technologiemanagement. In: *Technologiemanagement: Handbuch Produktion und Management 2*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [153] Schuh, G.; Lenders, M.; Nußbaum, C. und Rudolf, S.: Produktarchitekturgestaltung. In: Schuh, G. (Hrsg.): *Innovationsmanagement: Handbuch Produktion und Management 3*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [154] Schuh, G.; Riesener, M.; Breunig, S.; Dölle, C.; Ebi, M.; Schiffer, M. G.; Schloesser, S. und Schrey, E.: *Produktkomplexität managen : Strategien-Methoden-Tools*. Hanser Verlag, München, 3. Auflage, 2018.
- [155] Schulte-Gehrmann, A.-L.; Klappert, S.; Schuh, G. und Hoppe, M.: Technologiestrategie. In: *Technologiemanagement: Handbuch Produktion und Management 2*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [156] Seeler, K. A.: *System Dynamics: An Introduction for Mechanical Engineers*. Springer New York, New York, 2014.
- [157] Seidl, J.: *Multiprojektmanagement : Übergreifende Steuerung von Mehrprojektsituationen durch Projektportfolio- und Programmmanagement*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.

- [158] Shaw Development LLC.: Robotic Refueling System (RFS). Online Produktbeschreibung. URL <http://fluid-management.shawdev.com/item/all-categories/robotic-refueling-system/1430>. Zugriff: 10-07-2018.
- [159] Spangenberg, F.: *Technologie-Roadmapping bei Systeminnovationen: am Beispiel der Einführung von elektrischen Bussen im Nahverkehr*. Dissertationsschrift, Technische Universität Berlin, 2014.
- [160] Spangenberg, F. und Göhlich, D.: Technology Roadmapping Based on Key Performance Indicators. In: Abramovici, M. und Stark, R. (Hrsg.): *Smart Product Engineering: Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference, Bochum, 11-13. März, 2013*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [161] Spath, D.: *Forschungs- und Technologiemanagement : Potenziale nutzen - Zukunft gestalten*. Hanser Verlag, München, 2004.
- [162] Specht, D. und Möhrle, M. G.: *Gabler Lexikon Technologie Management: Management von Innovationen und neuen Technologien im Unternehmen*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2002.
- [163] Specht, D.; Beckmann, C. und Amelingmeyer, J.: *F&E-Management : Kompetenz im Innovationsmanagement*. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2002.
- [164] Specht, D.; Behrens, S. und Richter, M.: Integration der Technologieplanung in die strategische Geschäftsfeldplanung mit Hilfe von Roadmaps. In: Möhrle, M. G. und Isenmann, R. (Hrsg.): *Technologie-Roadmapping: Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [165] Specht, G. und Zörgiebel, W. W.: Technologieorientierte Wettbewerbsstrategien. In: *Marketing: ZFP: journal of research and management*, 7, 3, S. 161–172, 1985.
- [166] Spieser, K.; Treleaven, K.; Zhang, R.; Frazzoli, E.; Morton, D. und Pavone, M.: Toward a Systematic Approach to the Design and Evaluation of Automated Mobility-on-Demand Systems: A Case Study in Singapore. In: Meyer, G. und Beiker, S. (Hrsg.): *Road Vehicle Automation, (Lecture Notes in Mobility)*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [167] Spyratos, N. und Sugibuchi, T.: PROPER - A Graph Data Model Based on Property Graphs. In: Grant, E.; Kotzinos, D.; Laurent, D.; Spyratos, N. und Tanaka, Y. (Hrsg.): *Information Search, Integration, and Personalization*. Springer International Publishing, Cham, 2016.
- [168] Stocker, A. und Shaheen, S.: Shared Automated Vehicle (SAV) Pilots and Automated Vehicle Policy in the U.S.: Current and Future Developments. In: Meyer, G. und Beiker, S. (Hrsg.): *Road Vehicle Automation 5*. Springer International Publishing, Cham, 2019.
- [169] Struckmann, W. und Wätjen, D.: Graphentheorie. In: *Mathematik für Informatiker: Grundlagen und Anwendungen*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [170] Sure, M.: Internationales Technologiemanagement. In: *Internationales Management: Grundlagen, Strategien und Konzepte*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2017.
- [171] SZ DJI Technology Co., Ltd.: DJI Matrice 600. Online Produktbeschreibung. URL <https://www.dji.com/de/matrice600>. Zugriff: 21-01-2019.

- [172] Teiwes, J.; Bänziger, T.; Kunz, A. und Wegener, K.: Identifying the potential of human-robot collaboration in automotive assembly lines using a standardised work description. In: *2016 22nd International Conference on Automation and Computing (ICAC)*. 2016.
- [173] Thomopoulos, N. und Givoni, M.: The autonomous car—a blessing or a curse for the future of low carbon mobility? An exploration of likely vs. desirable outcomes. In: *European Journal of Futures Research*, 3, 1, S. 14, 2015.
- [174] Timpner, J.; Schürmann, D. und Wolf, L.: Trustworthy Parking Communities: Helping Your Neighbor to Find a Space. In: *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 13, 1, S. 120–132, 2016.
- [175] Toro Ramos, J. M.: *Strategieentwicklung zum kamerabasierten Stecken eines Ladesteckers in ein Elektrofahrzeug und Implementierung in einen Low-Cost-Roboter*. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Abschlussarbeit, auf Anfrage einsehbar, 2017.
- [176] Trommer, S.; Kröger, L. und Kuhnimhof, T.: Potential Fleet Size of Private Autonomous Vehicles in Germany and the US. In: Meyer, G. und Beiker, S. (Hrsg.): *Road Vehicle Automation 4*. Springer International Publishing, Cham, 2018.
- [177] Tschirky, H. und Koruna, S.: *Technologie-Management : Idee und Praxis*. Orell Füssli, Verlag, Zürich, 1998.
- [178] TU-Graz: Der Roboter als „Tankwart“: TU Graz entwickelt robotergesteuertes Schnellladesystem für E-Fahrzeuge. Online Pressemitteilung, August 2018. URL <https://www.tugraz.at/tu-graz/services/news-stories/medienservice/einzelansicht/article/der-roboter-als-tankwart-tu-graz-entwickelt-robotergesteuertes-schnellladesystem-fuer-e-fahrzeuge/>. Zugriff: 12-12-2018.
- [179] Uber Technologies Inc.: Autonomous vehicle sensor cleaning system. Erfinder: Rice, W. M.; Wittenstein, N.; Jin, Z.; Smith, P. K.; Kennelly, S. J.; Brueckner, P. und Rice, D. P. Oktober 2018. Anmeldedatum: April 2017. Patentschrift US 2018/0290631 A1.
- [180] Underwood, S.: *Automated, Connected and Electric Vehicle Systems*. University of Michigan - Institute for Advanced Vehicle Systems, 2017.
- [181] Universal Robots A/S: Universal Robot UR 10. Online Produktbeschreibung. URL <https://www.universal-robots.com/de/produkte/ur10-roboter/>. Zugriff: 10-12-2018.
- [182] Vahs, D. und Brem, A.: *Innovationsmanagement : von der Idee zur erfolgreichen Vermarktung*. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 4. Auflage, 2013.
- [183] VDA: Automatisierung - Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren. Online Veröffentlichung, September 2015. URL <https://www.vda.de/dam/vda/publications/2015/automatisierung.pdf>. Zugriff: 10-01-2017.
- [184] VDI 2221-1 Entwurf: *Entwicklung technischer Produkte und Systeme-Modell der Produktentwicklung (Entwurf)*. Verein Deutscher Ingenieure, 2018.

- [185] VDI 2225: *Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Vereinfachte Kostenermittlung*. Verein Deutscher Ingenieure, 1997.
- [186] VDI 3780: *Technikbewertung-Begriffe und Grundlagen*. Verein Deutscher Ingenieure, 2000.
- [187] VDI 5610: *Wissensmanagement im Ingenieurwesen Wissensbasierte Konstruktion (KBE)-Blatt 2*. Verein Deutscher Ingenieure, 2017.
- [188] Viereckl, R.; Ahlemann, D.; Koster, A.; Hirsh, E.; Kuhnert, F.; Mohs, J.; Fischer, M.; Gerling, W.; Gnanasekaran, K.; Kusber, J.; Stephan, J.; Crusius, D.; Kerstan, H.; Warnke, T.; Schulte, M.; Seyfferth, J. und Baker, E. H.: *Connected car report 2016: Opportunities, risk, and turmoil on the road to autonomous vehicles*. PricewaterhouseCoopers, 2016.
- [189] Volkswagen AG: e-smartConnect: Volkswagen is conducting research on an automated quick-charging system for the next generation of electric vehicles. Online Pressemitteilung, Juli 2015. URL <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/e-smartconnect-volkswagen-is-conducting-research-on-an-automated-quick-charging-system-for-the-next-generation-of-electric-vehicles-1512>. Zugriff: 16-08-2018.
- [190] Volkswagen AG: CarLa charges the car. Online Pressemitteilung, März 2018. URL <https://www.volkswagenag.com/en/news/stories/2018/03/karla-charges-the-car.html>. Zugriff: 16-01-2019.
- [191] Volkswagen AG: Verfahren zur Reinigung von Fahrzeugsensoren und unbemanntes Fluggerät für ein solches Verfahren. Erfinder: Schütz, D.; Herold, S.; Fondahl, K. und Helbig, M. Oktober 2019. Anmeldedatum: April 2018. Patentschrift DE 102018206520 A1.
- [192] Volkswagen AG: Laderoboter für ein Kraftfahrzeug, Verfahren, Vorrichtung und computerlesbares Speichermedium mit Instruktionen zur Steuerung eines Laderoboters. Erfinder: Schütz, D.; Herold, S.; Fondahl, K.; Schlabe, R.; Bösenberg, M.; Jörg, M.; Hammouche, N. und Sahin, Ö. Y. November 2019. Anmeldedatum: Mai 2018. Patentschrift DE 102018207680 A1.
- [193] Volkswagen AG, KUKA Roboter GmbH: Omnidirektional mobile Kraftfahrzeug-Transportplattform, zugehörige Kraftfahrzeug-Versorgungsstation und Parksystem. Erfinder: Schütz, D. und Settele, N. Juni 2018. Anmeldedatum: Dezember 2016. Patentschrift DE 102016224098 A1.
- [194] Volvo Group: Refuse truck driver is supported by robot. Online Pressemitteilung, September 2015. URL [https://www.volvogroup.com/content/dam/volvo/volvo-group/markets/global/en-en/news/2015/150916\\_roar\\_en.pdf](https://www.volvogroup.com/content/dam/volvo/volvo-group/markets/global/en-en/news/2015/150916_roar_en.pdf). Zugriff: 10-09-2018.
- [195] Vorbach, S.: Technologiemanagement. In: Granig, P.; Hartlieb, E. und Lercher, H. (Hrsg.): *Innovationsstrategien: Von Produkten und Dienstleistungen zu Geschäftsmodellinnovationen*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014.

- [196] VSI-Labs: The Emerging AV Eco-System – Who Will Drive Automated Mobility on Demand? Online Veröffentlichung. URL <https://vsi-labs.com/knowledge/2018/1/6/automated-mobility-on-demand-who-will-drive-tomorrows-car-industry>. Zugriff: 12-10-2018.
- [197] Wachenfeld, W.; Winner, H.; Gerdes, C.; Lenz, B.; Maurer, M.; Beiker, S. A.; Fraedrich, E. und Winkle, T.: Use-Cases des autonomen Fahrens. In: Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B. und Winner, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [198] Walzel, B.; Hirz, M. und Brunner, H.: Anforderungen an die Tankstelle im Jahr 2025. In: *Symposium Energieinnovation, 10-12.02.2016, Graz/Österreich*, 2016.
- [199] Walzel, B.; Sturm, C.; Fabian, J. und Hirz, M.: Automated robot-based charging system for electric vehicles. In: Bargende, M.; Reuss, H.-C. und Wiedemann, J. (Hrsg.): *16. Internationales Stuttgarter Symposium: Automobil- und Motorentechnik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2016.
- [200] Walzel, B.; Brunner, H. und Hirz, M.: Autonomes Parken und Laden von E-Fahrzeugen. In: *Berichte des Österreichischen Vereins für Kraftfahrzeugtechnik (ÖVK)*. 2018.
- [201] Wansart, J.: *Analyse von Strategien der Automobilindustrie zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Flottenemissionen und zur Markteinführung alternativer Antriebe: Ein systemdynamischer Ansatz am Beispiel der kalifornischen Gesetzgebung*. Dissertationsschrift, Technische Universität Braunschweig, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2012.
- [202] Weck, M. und Staimer, D.: Parallel Kinematic Machine Tools – Current State and Future Potentials. In: *CIRP Annals*, 51, 2, S. 671–683, 2002.
- [203] Wege, P.: Technologieschutz – rechtliche und strategische Erwägungen. In: Ensthaler, J. und Wege, P. (Hrsg.): *Management geistigen Eigentums: Die unternehmerische Gestaltung des Technologieverwertungsrechts*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [204] Wellensiek, M.; Schuh, G.; Hacker, P. A. und Saxler, J.: Technologiefrüherkennung. In: *Technologiemanagement: Handbuch Produktion und Management 2*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [205] Werle, M.; Will, P.; Hülshorst, T. und Yano, K.: Offene Service-Plattformen für das intelligente Fahrzeug. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 118, 5, S. 58–63, 2016.
- [206] Werners, B.: *Grundlagen des Operations Research : mit Aufgaben und Lösungen*. Springer, Berlin, Heidelberg, 3. Auflage, 2013.
- [207] Wolfrum, B.: *Strategisches Technologiemanagement*. Dissertationsschrift, Universität Bayreuth, Gabler Verlag, Wiesbaden, 1994.
- [208] Wolschke, C.; Rombach, D.; Liggesmeyer, P. und Kuhn, T.: Mining Test Inputs for Autonomous Vehicles. In: Berns, K.; Dressler, K.; Fleischmann, P.; Görges, D.; Kalmar, R.; Sauer, B.; Stephan, N.; Teutsch, R. und Thul, M. (Hrsg.): *Commercial Vehicle Technology 2018*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2018.



- [209] Zopp, J.: *Systemisches und evolutionsbasiertes Technologiemanagement*. Dissertationsschrift, Technische Universität Braunschweig, Vulkan-Verlag, Essen, 2013.

# A Anhang

## A.1 Entwicklungsstufen des automatisierten Fahrens

Bei der Automatisierung von Fahrfunktionen werden, je nach Grad der Automation, sechs Stufen unterschieden. Um ein einheitliches Verständnis zu schaffen, werden zunächst verschiedene Stufen des automatisierten Fahrens beschrieben und die hiermit verbundenen Begriffe voneinander abgegrenzt. Als Grundlage dienen die Definitionen vom VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE (VDA) [183] für den deutschen, sowie die Definitionen der NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (NHTSA) [114] und der SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE) [141] für den amerikanischen Raum.

Erhält der Fahrer keine aktive Unterstützung durch das Fahrzeug, wird von einer *manuellen Fahraufgabe (Stufe 0)* gesprochen. Hierbei übernimmt der Fahrer sowohl die Fahrzeugführung als auch die Überwachung des Fahrzeugumfelds. Lediglich passive Unterstützungsmaßnahmen, beispielsweise durch einen Totwinkelassistenten oder eine Rückfahrkamera, tragen zu einer Steigerung der passiven Sicherheit bei [79]. Wird der Fahrer darüber hinaus aktiv durch den Eingriff von FAS unterstützt, wird von einem *assistierten Fahren (Stufe 1)* gesprochen. Hierbei erfolgt in eingeschränkten Situationen ein Eingriff in die Längs- oder Querführung des Fahrzeugs, wobei der Fahrer jederzeit in der Lage sein muss, in das System einzugreifen. Ein Beispiel für ein solches FAS ist eine Adaptive Cruise Control (ACC), die situativ die Fahrzeuglängsführung übernimmt [117, 128]. Die nächste Stufe der Automatisierung wird durch das sogenannte *teilautomatisierte Fahren (Stufe 2)* gebildet. Hierbei werden in spezifischen Anwendungsfällen durch FAS sowohl die Fahrzeuglängs- als auch Fahrzeugquerführung übernommen. Der Fahrer muss jedoch kontinuierlich das Umfeld überwachen und jederzeit in der Lage sein, die Fahrzeugführung zu übernehmen. Beispiele für diese Form der Automation sind Stau- oder Einparkassistenten [80].

**Tabelle A.1:** Übersicht verschiedener Stufen des automatisierten Fahrens nach SAE J3016 [141]

	Beschreibung	Längs-/ Querführung	Umfeldüber- wachung	Rückfall- ebene	Situationen
<b>Stufe 0</b>	manuell	Mensch	Mensch	Mensch	-
<b>Stufe 1</b>	assistiert	Mensch/System	Mensch	Mensch	Eingeschränkt
<b>Stufe 2</b>	teilautomatisiert	System	Mensch	Mensch	Eingeschränkt
<b>Stufe 3</b>	hochautomatisiert	System	System	Mensch	Eingeschränkt
<b>Stufe 4</b>	vollautomatisiert	System	System	System	Eingeschränkt
<b>Stufe 5</b>	fahrerlos	System	System	System	Alle

Bei einer weiteren Steigerung der Automation wird vom *hochautomatisierten Fahren (Stufe 3)* gesprochen. Hierbei werden, ähnlich wie bei Stufe 2, die Fahrzeugquer- und Fahrzeuglängsführung in spezifischen Anwendungsfällen übernommen. Jedoch erkennt das System selbstständig

seine Grenzen und kann den Fahrer innerhalb einer definierten Übergabezeit dazu auffordern, die Kontrolle zu übernehmen. Somit ist eine dauerhafte Überwachung des Umfelds durch den Fahrer nicht mehr zwingend notwendig. Als Beispiel hierfür kann der sogenannte Autobahnpilot genannt werden, der die Fahrzeugführung auf definierten Autobahnabschnitten übernehmen kann [88]. Die nächste Ausbaustufe wird als *vollautomatisiertes Fahren (Stufe 4)* bezeichnet. Hierbei kann das Fahrzeug ebenfalls die vollständige Fahrzeugführung übernehmen, benötigt im Gegensatz zu Stufe 3 jedoch keine menschliche Rückfallebene. Hieraus ergeben sich Übergabezeiten zwischen Fahrzeug und Fahrer von mehreren Minuten, was die Durchführung von Nebentätigkeiten für den Fahrer ermöglicht [117]. Jedoch ist auch hier der Einsatz auf spezifische Anwendungsfälle beschränkt. Die letzte Ausbaustufe automatisierter Fahrfunktionen bildet das *fahrerlose Fahren (Stufe 5)*. Hier werden die Fahraufgaben vollumfänglich in allen Anwendungsfällen vom Fahrzeug übernommen und ein Mensch ist als Rückfallebene nicht mehr erforderlich. Dies umfasst sämtliche Geschwindigkeits-, Witterungs- und Straßenverhältnisse [7]. In Tabelle A.1 sind die verschiedenen Automatisierungsstufen und die vom Automatisierungssystem übernommenen Aufgaben zusammengefasst.

Zur Erreichung einer vollautomatisierten Fahrfunktionen werden unterschiedliche Wege verfolgt. Während die klassischen Automobilhersteller evolutionäre Ansätze verfolgen und durch die kontinuierliche Weiterentwicklung von FAS auf eine Automatisierung des Fahrens hinarbeiten, verfolgen Technologieunternehmen abseits der Automobilindustrie wie GOOGLE oder APPLE einen revolutionären Ansatz [7, 118]. Hierbei wird versucht, das vollautomatisierte Fahren durch den Einsatz neuartiger Technologien wie künstlicher Intelligenz zu erreichen, um die Limitationen klassischer regelungstechnischer Ansätze, in der sämtliche Fahrsituationen explizit beschrieben sein müssen, zu umgehen [7].

## A.2 Bedarf für angepasste Servicekonzepte in automatisierten Mobilitätssystemen

Im Fokus neuer Servicekonzepte für die *automatisierte Individualmobilität* wird vornehmlich die Steigerung des Kundenkomforts stehen. Bedingt durch zukünftige AFF wird der Fahrer situativ entfallen und nicht für Servicetätigkeiten, wie beispielsweise das Betanken oder die Sensorreinigung, zur Verfügung stehen. Die Problematik lässt sich am Beispiel des Projekts V-CHARGE [26, 51] verdeutlichen. Durch die innerhalb des Projekts realisierte automatisierte Parkfunktion entsteht ein Potenzial für die Automatisierung des Ladevorgangs. Durch die Parkfunktion wird der Fahrer im ersten Schritt von der Parkaufgabe entlastet. Jedoch wird der Fahrer theoretisch für das Konduktieren des Ladekabels benötigt. Aus diesem Grund ist für die Tätigkeit des Ladens ein neues Servicekonzept vonnöten. Im Fall des Projekts V-CHARGE wird dies über eine induktive Ladelösung realisiert [26].

Im Gegensatz zur automatisierten Individualmobilität wird in *automatisierten Mobilitätssystemen* der Bedarf für eine andere Form der Servicekonzepte entstehen, da andere Randbedingungen vorherrschen [7, 47]. Die Wirtschaftlichkeit der Mobilitätssysteme ist maßgeblich von der Verfügbarkeit der Fahrzeugflotte abhängig [21, 166]. Neue Servicekonzepte sind hierbei durch die konträre Entwicklung motiviert, dass ein Entfall des Fahrers perspektivisch möglich wäre, jedoch durch den steigenden Bedarf an Servicetätigkeiten auch die Anzahl und Frequenz von Servicetätigkeiten, die durch den Fahrer durchgeführt werden müssten, steigt. Somit entsteht der Bedarf,

den Entfall des Fahrers zu kompensieren und die Verfügbarkeit der Fahrzeuge zu maximieren. Neben Servicetätigkeiten, die auf die Betriebsbereitschaft des Fahrzeugs einzahlen, müssen ferner Tätigkeiten adressiert werden, die auf den Kundenkomfort abzielen. Zu diesen Servicetätigkeiten zählt beispielsweise die Innenraumreinigung [25]. Auch die zukünftigen Haftungsproblematiken (vgl. Abschnitt 2.2.1) führen dazu, dass neue Servicekonzepte zur Sicherstellung der Betriebsbereitschaft benötigt werden.

### A.3 Überblick verschiedener Kategorisierungsmerkmale für Technologien

Über die in Abschnitt 3.1 beschriebenen Merkmale hinaus existieren weitere Möglichkeiten zur Kategorisierung von Technologien, welche im Folgenden Abschnitt erläutert werden. Die *Bedeutung im Wertschöpfungsprozess* einer Technologie wird nach FRAUENFELDER durch die Beziehung einer Technologie zu der realisierten Produktfunktion charakterisiert (vgl. Abschnitt 3.1.2) [48]. Die Hauptfunktionen eines Produkts werden demnach durch Kerntechnologien realisiert, wohingegen Komplementär- und Zusatztechnologien für die Realisierung von Neben- und Hilfsfunktionen eingesetzt werden [48, 209].

**Tabelle A.2:** Mögliche Klassifikationsmerkmale von Technologie [19, 55, 58, 152, 162, 177, 207]

Kriterium	Ausprägung			
Funktion	Produkttechnologie		Prozesstechnologie	
Wettbewerbsrelevanz	Neue Technologie	Schrittmachertechnologie	Schlüsseltechnologie	Basistechnologie
Potenzial	Neue Technologie		Etablierte Technologie	Verdrängte Technologie
Lebenszyklus	Entstehung	Wachstum	Reife	Alter
Bedeutung im Wertschöpfungsprozess	Kerntechnologie		Komplementärtechnologie	Zusatztechnologie
Anwendungsebene	Komponententechnologie		Modultechnologie	Systemtechnologie
Anwendungsbreite	Querschnittstechnologie		Spezifische Technologie	
Aggregationsebene	Technologiefelder		Einzeltechnologie	
Beziehung	Neutrale Technologie		Ergänzende Technologie	Ersetzende Technologie

Eine weitere Unterscheidung von Technologien kann in der *Anwendungsebene* und *Anwendungsbreite* vorgenommen werden. In der Anwendungsebene wird zwischen Komponenten-, Modul-, und Systemtechnologien anhand ihrer Position in der Technologiestruktur eines Produkts oder Prozesses differenziert [58, 177]. Die Anwendungsbreite einer Technologie ist hingegen durch ihre Einsatzmöglichkeiten charakterisiert. Querschnittstechnologien finden in vielen Feldern

Anwendung, wohingegen spezifische Technologien einen sehr beschränkten Einsatzraum besitzen [19, 177]. Das Kriterium der *Aggregationsebene* zielt auf eine Clusterung von Technologien ab. Es wird zwischen Einzeltechnologie und Technologiefeldern unterschieden [19, 58, 122]. Innerhalb eines solchen Technologiefelds kann über die *Beziehung* einer Technologie die Relation zu anderen Technologien beschrieben werden. Hierbei wird zwischen neutralen, ergänzenden und ersetzenden Technologien unterschieden [19, 121].

## A.4 Ebenen des Technologiemanagements

**Tabelle A.3:** Ebenen des Technologiemanagements [19, 177, 207, 209]

Technologiemanagement		
normativ	strategisch	operativ
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definition der technologischen Grundausrichtung</li> <li>• Bildung von Technologieleitbild und Technologiepolitik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Umsetzung der Technologiepolitik in eine Technologiestrategie</li> <li>• Steuerung der technologischen Ausrichtung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Koordination der strategisch definierten Projekte</li> <li>• Überwachung der Realisierung und Umsetzung definierter Projekte</li> </ul>

## A.5 Vorgehen zur Bildung und Umsetzung der Technologiestrategie

Übergeordnetes Ziel der Technologiestrategie ist es, Technologiepolitik, technologische Ziele und technologische Aktivitäten in einem Unternehmen in einen Gesamtkontext zu bringen und im Sinne der Geschäftsfeld, Markt- und Wettbewerbsstrategie abzustimmen und zu synchronisieren [18, 155] und so die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens zu sichern oder auszubauen [207]. Um dieses Ziel zu erreichen, beschäftigt sie sich mit der Planung von strategischen Maßnahmen und Aktivitäten im Technologiekontext [164]. Definiert werden die technologischen Ziele und der grundlegende Weg zur Erreichung dieser Ziele.

Die Bildung der Technologiestrategie erfolgt in einem mehrstufigen Prozess. Zwei Herangehensweisen sind möglich. Bei der *Inside-Out*-Herangehensweise werden die internen Technologiekompetenzen als Ausgangsbasis für zukünftige Marktführerschaften analysiert. Diese Form der Technologiestrategie wird auch als *Technology-Push*-Strategie bezeichnet, bei der unabhängig von den Marktbedürfnissen Innovationen auf Grundlage neuer Technologien entwickelt werden. Hierbei besteht jedoch die Gefahr, Produkte zu entwickeln, die am Markt keinen Kundennutzen erfüllen und nicht erfolgreich sind. Bei der *Outside-In*-Herangehensweise, die in einer sogenannten *Market-Pull*-Strategie resultiert, wird das Unternehmensumfeld betrachtet und eine Positionierung im Markt anhand des Wettbewerbs vorgenommen. Somit induzieren die Bedürfnisse am Markt eine Entwicklungsaktivität innerhalb des Unternehmens. [155, 162]

Aufgrund der Schnelllebigkeit von Technologiemarkten ist eine Outside-In-Betrachtung in vielen Fällen nicht zielführend, da sich die Marktumgebungen dynamischer entwickeln als die Technologiekompetenzen [110], jedoch ist das verbundene Risiko geringer als bei der Inside-Out-Herangehensweise. Die Entwicklung einer Technologiestrategie erfolgt in einem mehrstufigen Verfahren. In einer ersten Betrachtung werden zunächst die unternehmensinternen Technologien analysiert. Aufbauend hierauf werden unternehmensexterne Technologien, Trends und Wettbewerbstechnologien untersucht und die Ergebnisse im Anschluss konsolidiert. Durch diesen Soll-Ist-Abgleich werden die technologischen Alleinstellungsmerkmale und Basistechnologien im Unternehmen identifiziert. In enger Anlehnung an die Markt- und Wettbewerbsstrategie erfolgt die eigentliche Formulierung der Technologiestrategie mit ihren Dimensionen Technologieauswahl, Technologieverwertung, technologische Leistungsfähigkeit, Technologietiming und Technologiequelle. Zum Abschluss erfolgt eine Konsistenzprüfung mit anderen Technologiestrategien innerhalb des Unternehmens. [155]

Die Operationalisierung der Technologiestrategie erfolgt in der Technologieplanung, indem kontextspezifische Technologiepläne aus der Technologiestrategie abgeleitet werden und die Inhalte der Technologiestrategie konkretisiert werden. Die Technologiepläne unterliegen im Gegensatz zur Technologiestrategie kürzeren Überarbeitungsintervallen, um den dynamischen Technologieentwicklungsprozessen gerecht zu werden [146, 155].

## A.6 Technologiefrüherkennung

Ziel der Technologiefrüherkennung ist die Beobachtung des Unternehmensumfelds, um frühzeitig Potenziale oder Gefahren für die Unternehmensentwicklung zu identifizieren [204]. Sie bildet die Grundlage für alle weiteren Entscheidungen im technologischen Kontext durch die Aufbereitung einer breiten Wissensbasis und umfasst die Informationsbeschaffung und die Informationsbewertung über die Entwicklung von Technologien und Technologiefeldern [106]. Die Informationsbeschaffung kann weiter in die Felder Scanning, Scouting und Monitoring unterteilt werden [85]. Unter dem Technologiscanning wird die stetige und ungerichtete Suche nach aktuellen Entwicklungen im Umfeld des Unternehmens verstanden, sowohl mit definiertem als auch undefiniertem Themenbezug [106]. Im Gegensatz hierzu werden beim Scouting nur relevante Informationen zu bestimmten Technologiefeldern betrachtet, also eine Fokussierung vorgenommen [204]. Hiergegen grenzt sich das Monitoring durch die stetige Betrachtung einer bereits identifizierten Technologie oder eines Technologiefelds ab, das sich im Unternehmensumfeld entwickelt [85].

Die Informationsbewertung hat im Anschluss die Aufgabe, die gesammelten Informationen zu konkretisieren und aufzubereiten, um eine Grundlage für die strategischen Entscheidungen im Technologiemanagement bereitzustellen [204]. Dies wird zum einen durch Analyse und gezielte Filterung der gesammelten Informationen und zum anderen durch eine Extrapolation zukünftiger Entwicklungen und Ableitung von Handlungsempfehlungen erreicht [204]. Die Früherkennung ist durch ihre stark in die Zukunft gerichtete Betrachtungsweise von hohen Unsicherheiten geprägt, weshalb vor allem qualitative Methoden wie die Szenario- oder Portfoliotechniken zum Einsatz kommen [60]. Ergänzend werden aber auch quantitative Methoden wie Patent- und Literaturanalysen genutzt.

## A.7 Aufgaben der Technologieplanung

**Tabelle A.4:** Differenzierung von strategischer und operativer Technologieplanung [42, 146, 151]

<b>Aufgaben der Technologieplanung</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auswahl der Technologien</li> <li>• Bestimmung der Leistungsfähigkeit einer Technologie</li> <li>• Ermittlung des Zeitraums des Technologieeinsatzes</li> <li>• Festlegung der Technologiequelle (inter/extern)</li> <li>• Synchronisierung von Produkt- und Technologieplanung</li> <li>• Wirtschaftliche Bewertung der Technologien</li> <li>• Technologieentwicklungsprojekte ausgestalten</li> <li>• Ausarbeitung des Technologieplans</li> </ul>	
<b>strategische Technologieplanung</b>	<b>operative Technologieplanung</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Langfristiger Planungshorizont</li> <li>• Relativ hohe Unsicherheit</li> <li>• undefinierte Produktvorgaben</li> <li>• Interne und externe Technologien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kurzfristiger Planungshorizont</li> <li>• Relativ geringe Unsicherheit</li> <li>• Definierte Produktvorgaben</li> <li>• Nur interne Technologien</li> </ul>

## A.8 Inhalte der Technologieentwicklung

Die Technologieentwicklung umfasst die Umsetzung der im Technologieplan definierten Vorhaben und zielt auf die Wahrung und Weiterentwicklung der technologischen Leistungsfähigkeit des Unternehmens ab. Dies umfasst die Erforschung, Vorentwicklung und Entwicklung der im Technologieplan definierten Produkt- und Prozesstechnologien, um diese im Anschluss an die Produkt- oder Prozessentwicklung zu transferieren [151]. Die Ziele sind also die Steigerung der Technologiereife bestehender Technologien (vgl. Abschnitt 3.1) sowie die Überführung von in der Forschung und Vorentwicklung aufgestellten Theorien in Technologien (vgl. Abbildung 3.3). Hierbei werden Technologiestudien oder Prototypen zur ihrer Anwendungstauglichkeit getrieben. Im Anschluss wird das erlangte Wissen über die Produktentwicklung direkt in Produkte oder über die Prozessentwicklung in die Produktion integriert [151]. Die Aktivitäten sind eingebettet in die allgemeinen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten eines Unternehmens, wodurch thematische Schnittmengen entstehen [76]. Die Technologieentwicklung grenzt sich jedoch durch den abstrakteren Produktbezug von den übrigen Entwicklungstätigkeiten ab [15]. Es steht kein konkretes Produkt im Vordergrund, sondern das Ziel, die Wissensbasis für eine spätere Produkt- oder Prozessentwicklung zu schaffen und beispielsweise die technologische Machbarkeit in Pilotanlagen nachzuweisen [76]. Die in dieser Phase eingesetzten Methoden werden an dieser Stelle nicht weiter vertieft, da diese der klassischen Produktentwicklung ähneln [76, 184].

## A.9 Inhalte der Technologieverwertung

Die Technologieverwertung setzt sich mit den Fragestellungen der monetären und leistungsmäßigen Nutzung von Technologiepotenzialen in einem Unternehmen auseinander [17, 149]. Hierbei

kann grundsätzlich zwischen der internen und der externen Verwertung unterschieden werden [149]. Bei der internen Verwertung liegt der Fokus auf einer Nutzung in bestehenden oder neu entstehenden Produkten und Prozessen des Unternehmens, um sich einen Wettbewerbsvorteil zu verschaffen. Um die Rendite der Technologieinvestition zu erhöhen, sollten neue Technologien in möglichst vielen Produkten und Prozessen zum Einsatz kommen. In der externen Verwertung werden die Technologien Dritten zur Verfügung gestellt, um die finanzielle Rendite einer Technologieinvestition zu steigern. Dies kann zum Beispiel durch die Lizenzvergabe, Joint-Ventures oder den Technologieverkauf erfolgen [149, 207]. Durch die Technologieverwertungsstrategie eines Unternehmens wird dabei festgelegt, wie welche Technologie zu verwerten ist [177].

## **A.10 Inhalte des Technologieschutzes**

Die letzte Phase des Technologiemanagements bildet der Technologieschutz, dessen Aufgabe die Sicherung des Technologie-Know-hows eines Unternehmens vor dem Abfließen an Wettbewerber oder einem Diebstahl ist [112]. So werden geeignete Strategien, wie beispielsweise die künstliche Komplexitätssteigerung, erarbeitet, um die Imitation oder unrechtmäßige Nutzung durch Wettbewerber zu verhindern [112]. Hier ist die enge Kooperation mit Zulieferern eine Möglichkeit des Protektionismus [203]. Da in dieser Arbeit nicht weiter auf den Technologieschutz eingegangen wird, soll an dieser Stelle auf die entsprechende Literatur verwiesen werden [112, 203].

## **A.11 Inhalte der Technologiebewertung**

Die Technologiebewertung als Querschnittsfunktion unterstützt das Technologiemanagement an einer Vielzahl von Entscheidungspunkten entlang des Technologielebenszyklus [60]. Als Grundlage für die Betrachtung dient die VDI-Richtlinie 3780 [186]. Sie beschreibt die Technologiebewertung als Vorgehen zur Untersuchung des Stands der Technik und Analyse von Entscheidungsmöglichkeiten, die Folgen dieser Alternativen abschätzt und beurteilt, um Handlungsmöglichkeiten abzuleiten, sodass begründete Entscheidungen ermöglicht, getroffen und verwirklicht werden können. Sie unterstützt das Technologiemanagement an Entscheidungssituationen durch eine Strukturierung der Informationsbasis zur Bildung einer Entscheidungsgrundlage und das Aufzeigen von Entscheidungsalternativen [19].

Entlang der Phasen des Technologiemanagements (vgl. Abbildung 3.5) werden unterschiedliche Fragestellungen verfolgt. Während in der Früherkennung die Entwicklungspotenziale neuer Technologien im Fokus der Bewertung liegen, werden in der Verwertung tendenziell monetäre Fragestellungen beantwortet [60]. In Tabelle A.5 ist eine Übersicht über Entscheidungssituationen entlang des Technologiemanagements, die durch die Technologiebewertung unterstützt werden, dargestellt.

Die zur Bewertung eingesetzten Methoden lassen sich grundsätzlich in qualitative und quantitative Methoden unterteilen. Während in frühen Phasen, geprägt durch eine hohe Unsicherheit und Komplexität, zumeist qualitative Methoden Anwendung finden, werden in späten Phasen, in der sehr konkrete Bewertungsgrößen vorliegen, vorwiegend quantitative Methoden verwendet



**Tabelle A.5:** Aufgaben und Phasen der Technologiebewertung [42, 60]

Technologie-früherkennung	Technologie-planung	Technologie-entwicklung	Technologie-verwertung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Festlegung von Suchfeldern für neue Technologien</li> <li>• Vorbewertung von identifizierten Technologien (schwache Signale)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definition von Leistungsniveau, Herkunft und Einsatzzeitpunkt</li> <li>• Initiierung von Technologieprojekten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Controlling von laufenden Technologieprojekten</li> <li>• Entscheidungen an Gates (Fortsetzung, Abbruch, Verzögerung)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entscheidung über Technologieverwertung (intern, extern, hybrid)</li> </ul>

[60, 84, 195]. Weiterhin kann zwischen klassifikatorischen, komparativen und metrisierenden Methoden unterschieden werden. Bei klassifikatorischen Bewertungen werden die Technologien in Cluster eingeteilt, wohingegen komparative Methoden die Technologien zueinander ins Verhältnis setzen. Metrisierende Methoden versuchen, die Technologien durch numerische Werte zu beschreiben und objektiv vergleichbar zu machen [60, 123]. Die zeitliche Betrachtungsrichtung der Methoden unterscheidet sich ebenfalls. Eine vertiefte Betrachtung einzelner Methoden erfolgt in Abschnitt 3.4.

## A.12 Allgemeine Anforderungen an das Technologiemanagement

An die strategische Technologieplanung und die Methoden, die in der Technologieplanung zum Einsatz kommen, werden unterschiedlichste Anforderungen gestellt. Als Ausgangsbasis für die spätere Erarbeitung eines neuen Methodenansatzes sollen daher in diesem Abschnitt die relevanten Anforderungen für die spätere Methodenkonzeption definiert werden.

**Strategieintegration** Durch die Abhängigkeit von der Technologieentwicklung auf der einen und von Marktbedarfen auf der anderen Seite, gilt es, die Geschäftsfeld-, Markt-, Wettbewerbs- und Technologiestrategie in die strategische Technologieplanung und somit auch in die Methoden mit einzubeziehen (vgl. Abschnitt 3.3.1). Dabei zeigt die Technologieplanung auf, wie die in der Technologiestrategie definierten Ziele operativ realisiert werden können und die Technologiestrategie wiederum bietet die Grundlage für richtungsweisende Entscheidungssituationen [155, 165].

**Bewertung der Realisierbarkeit** Für eine zielgerichtete Technologieentwicklung ist es notwendig bereits in früher Phase eine Abschätzung der technologischen Realisierbarkeit der angestrebten Ziele vorzunehmen. Hierbei werden durch den langfristigen Planungshorizont der strategischen Technologieplanung (vgl. Abschnitt 3.3.2) sowohl die aktuellen technologischen Kompetenzen als auch mögliche Weiterentwicklungspotenziale und externe Technologiequellen berücksichtigt [155]. Als Bewertungskriterium wird hierbei vorwiegend auf die Technologiereife zurückgegriffen.

**Bewertung der Wirtschaftlichkeit** In der strategischen Technologieplanung gilt es, die wirtschaftliche Umsetzbarkeit eines Technologieprojekts zu bewerten und die langfristigen ökonomischen Auswirkungen abzuschätzen [123, 162]. Eine monetäre Bewertung erfolgt somit nicht nur im Hinblick auf die eigentliche Technologieentwicklung, sondern immer im Kontext der späteren Technologieverwertung (vgl. Abschnitt A.9). In einer frühen Phase, wie der strategischen Technologieplanung, ist es jedoch oftmals schwierig, die Kosten einer Technologieentwicklung abzuschätzen.

**Synchronisierung von Technologieprojekten** Eine weitere Herausforderung für eine effiziente Planung und Steuerung aller Technologieprojekte innerhalb eines Unternehmens stellen die vielfältigen Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Projekten dar. Im Bereich des Technologiemanagements gilt es, diese Abhängigkeiten zu erkennen und zu beherrschen.

**Berücksichtigung von Unsicherheiten** Durch die frühe Phase der Bewertung ist die Vielzahl von Informationen mit Unsicherheit behaftet. So lässt sich in einer frühen Phase der Technologieentwicklung, oder bei einem geringen Technologiereifegrad, die Erfolgswahrscheinlichkeit nur schwer abschätzen. Auch die wirtschaftliche Betrachtung von Technologieprojekten ist in dieser frühen Phase der Technologieplanung durch ein hohes Maß an Unsicherheiten geprägt. [38, 54, 60]

**Berücksichtigung von qualitativen und quantitativen Kriterien** Um eine Objektivität innerhalb der Methodik zu gewährleisten, sind die Bewertungskriterien vorzugsweise in Form von quantifizierten Größen zu berücksichtigen. Dennoch existieren, gerade im Rahmen der langfristigen Technologieplanung, auch qualitative Größen, die es zu berücksichtigen gilt. Ein Beispiel hierfür ist implizites Mitarbeiterwissen, das innerhalb des Methodenansatzes berücksichtigt werden muss.

**Berücksichtigung von Produkt- und Prozesstechnologien** Durch die starke Prozessorientierung im Themenfeld Automotive Service Robotics werden Prozess- und Produkttechnologien (vgl. Abschnitt 3.1.1) in den Applikationen miteinander verknüpft. Somit müssen geeignete Methoden in der Lage sein, beide Arten von Technologie zu berücksichtigen und entsprechend in die Bewertungsmetriken und Planungsprozesse einzubeziehen.

## A.13 Erweitertes UML-Diagramm des Technologiefeldgraphen

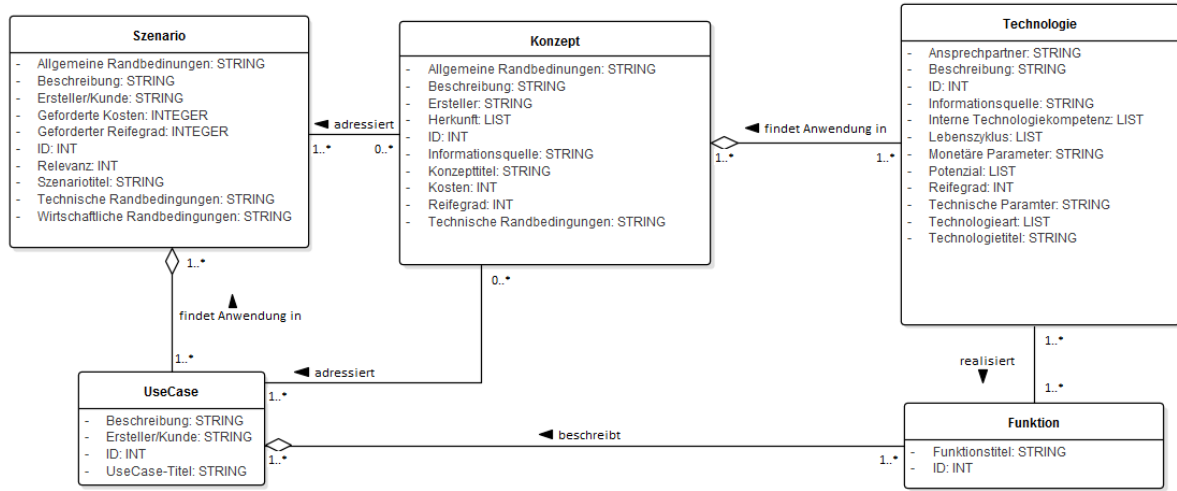


Abbildung A.1: Erweitertes UML Diagramm der Klassen im Graphen

## A.14 Wirtschaftlichkeitsberechnung der Use Cases

Berechnung der realistischen Kosten für einen Use Case  $U$  in Abhängigkeit des Konzepts  $K$  zum Zeitpunkt  $t$ .

$$\mathbf{HK}_{real}^{UK}(U_j, K_o, t_k) = \{ \mathbf{HK}_{real}^K(K_o, t_k) |^K \mathbf{A}_U(K_o, U_j) = 1 \} \forall U, K, t \quad (\text{A.1})$$

Berechnung der konzeptseitige minimal realisierbaren Kosten für einen Use Case  $U$  in Abhängigkeit des Szenarios  $S$  zum Zeitpunkt  $t$ .

$$\begin{aligned} \mathbf{HK}_{real}^{US|min}(U_j, S_i, t_k) &= \min_{\forall K_o \in K} \mathbf{HK}_{real}^{UK}(U_j, K_o, t_k) | \\ \mathbf{TRL}_{gef}^{US}(U_j, S_i, t_k) &\leq \mathbf{TRL}_{real}^K(K_o, t_k) \forall U, S, t, K. \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

## A.15 Detaillierte Bestimmung von Handlungsbedarf und Priorisierung

Im Folgenden wird die Anwendung der zuvor beschriebenen Verfahren zur Bestimmung von Handlungsbedarf und Priorisierung auf die einzelnen Ebenen des TFG beschrieben. Somit wird verdeutlicht, wie die Bewertung der knotenindividuellen Kenngrößen eine Aussage über das gesamte Technologiefeld ermöglicht.

**Szenario** Auf Ebene der Szenarien kann zwischen zwei Arten von Handlungsbedarf unterschieden werden. Die Bewertung ist angelehnt an die Bewertung der theoretischen und praktischen Realisierbarkeit (vgl. Abschnitt 5.4.1) und lässt sich mit der Bestimmung adjazenter Konzepte zu einem Szenario differenzieren. Ist innerhalb des TFG ein Konzept beschrieben, welches das Szenario adressiert, kann der konzeptorientierte Handlungsbedarf bestimmt werden und entsprechend auch den adjazenten Konzepten zugeordnet werden. Dieser potenzielle Handlungsbedarf beschreibt, welche Anforderungen durch die Szenarien gestellt werden, jedoch nicht durch die adjazenten Konzepte bedient werden können.

Durch  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^S(S, t)$  (vgl. Abschnitt 5.3.1) ist der geforderte Technologiereifegrad für die Szenarien bekannt. Diesem gegenüber steht der maximal erreichbare Reifegrad durch die Konzepte, bezogen auf einen Use Case. Der Reifegrad lässt sich nicht direkt aus der Zuordnung von Konzepten und Szenarien bestimmen, da unter Umständen mehrere Konzepte für die Realisierung eines Szenarios zum Einsatz kommen. Der minimale Reifegrad der verwendeten Konzepte definiert den realistischen Reifegrad des Szenarios. Daher wird betrachtet, welches Konzept welchen Use Case adressiert ( ${}^K\mathbf{A}_U(K_o, U_j) = 1$ ) und weiterhin berücksichtigt, ob dieser Use Case für das Szenario relevant ist ( ${}^U\mathbf{A}_S(U_j, S_i) = 1$ ). Entsprechend ergibt sich:

$$\mathbf{TRL}_{\text{real}}^S(S_i, t_k) = \min_{\forall K_o \in K} \{ \mathbf{TRL}_{\text{real}}^K(K_o, t_k) \mid {}^K\mathbf{A}_U(K_o, U_j) = 1, {}^U\mathbf{A}_S(U_j, S_i) = 1 \}. \quad (\text{A.3})$$

Durch Bildung der Differenz mit dem für ein Szenario gefordertes Reifegradniveau lässt sich ein Ausdruck für den konzeptorientierten, technologischen Handlungsbedarf für die Szenarien bestimmen. Dieser ergibt sich zu:

$$\mathbf{NFA}_{\text{tech|real}}^S(S, t) = \mathbf{TRL}_{\text{gef}}^S(S, t) - \mathbf{TRL}_{\text{real}}^S(S, t). \quad (\text{A.4})$$

Hier sind zwei Fälle zu unterscheiden: Gilt für das Szenario  $S_i$  zum Zeitpunkt  $t_k$ , dass  $\mathbf{NFA}_{\text{tech|real}}^S(S, t) \leq 0$ , wird der szenarioseitig geforderte Technologiereifegrad durch die Konzepte erfüllt und eine Realisierung gilt als praktisch umsetzbar. Gilt hingegen, dass der geforderte Reifegrad unterschritten wird, also  $\mathbf{NFA}_{\text{tech|real}}^S(S, t) > 0$ , besteht ein Handlungsbedarf. Für diesen Handlungsbedarf gilt es, entsprechende Maßnahmen zu definieren, wie beispielsweise eine Beschleunigung der Konzeptentwicklung oder eine Neutermiierung der Szenarioumsetzung. Ergänzend kann für alle Szenarien der Zeitpunkt  $t_k$  bestimmt werden, zu dem der konzeptgetriebene Technologiereifegrad die Anforderungen erfüllt, also  $\mathbf{NFA}_{\text{tech|real}}^S(S_i, t_k) \leq 0$  erreicht wird. Diese Aussagen lassen sich jedoch nur für Szenarien treffen, die ein adjazentes Konzept besitzen. Für Szenarien ohne adjazentes Konzept besitzt die Matrix  $\mathbf{NFA}_{\text{tech|real}}^S$  keine Aussagekraft.

Angelehnt an diese Bewertung kann auch der konzeptseitige Handlungsbedarf in monetärer Ausrichtung bestimmt werden. Durch  $\mathbf{HK}_{\text{real}}^{S|\min}$  (vgl. Gleichung 5.15) sind die realistisch erreich-

baren Kosten über den Zeitverlauf definiert. Die geforderten Kosten der Szenarien sind durch  $\mathbf{HK}_{\text{gef}}^S(S, t)$  gegeben. Da es sich um eine statische Kenngröße handelt, kann der Handlungsbedarf durch eine spaltenweise Subtraktion berechnet werden:

$$\mathbf{NFA}_{\text{mon|real}}^S(S, t) = \mathbf{HK}_{\text{real}}^{S|\text{min}}(S, t) - \mathbf{HK}_{\text{gef}}^S(S, t). \quad (\text{A.5})$$

In Anlehnung an die technologisch ausgerichtete Bewertung gilt hier, dass für  $\mathbf{NFA}_{\text{mon|real}}^S(S, t) \leq 0$  die konzeptseitig realisierbaren Kosten die geforderten Kosten unterschreiten und die Kostenziele erfüllt werden. Werden die gesetzten Kostenziele nicht erreicht, gilt  $\mathbf{NFA}_{\text{mon|real}}^S(S, t) > 0$  und ein entsprechender Handlungsbedarf besteht. Im Gegensatz zur technologisch ausgerichteten Bewertung des Handlungsbedarfs kann auch eine quantitative Bewertung erfolgen, da durch die Matrixeinträge das Kostendefizit abgebildet wird.

Ist für ein Szenario kein adjazentes Konzept im TFG definiert, kann der technologieorientierte Handlungsbedarf bestimmt werden. Hierbei wird auf dem Konzept der theoretischen Realisierbarkeit aufgebaut (vgl. Abschnitt 5.4.1). Ist für ein Szenario kein konkretes Konzept beschrieben, kann bewertet werden, in welchem Maße die relevanten Technologien die Anforderungen erfüllen und welcher Handlungsbedarf zur Realisierung der gesetzten Anforderungen besteht. Durch  $\mathbf{TRL}_{\text{theo}}^F(F, t)$  (vgl. Gleichung 5.9) ist im Rahmen der Realisierbarkeitsbewertung bestimmt, welche Funktion  $F_l$  zu welchem Zeitpunkt  $t_k$  mit welchem Reifegrad durch die Technologien realisiert werden kann. Durch die Relationsmatrix  ${}^F\mathbf{A}_U$  kann dieser maximal erreichbare Reifegrad auf die Ebene der Use Cases projiziert werden.

Hierbei definiert der minimale Reifegrad der adjazenten Funktionen den maximalen Reifegrad des Use Cases. Dieser Zusammenhang begründet sich durch die funktionale Produktstruktur, nach der die Teilfunktionen die Gesamtfunktion definieren (vgl. Abschnitt 3.1). Der technologisch erreichbare Reifegrad eines Use Case lässt sich bestimmen zu:

$$\mathbf{TRL}_{\text{theo}}^U(U_j, t_k) = \min_{\forall F_l \in F} \{ \mathbf{TRL}_{\text{theo}}^F(F_l, t_k) \mid {}^F\mathbf{A}_U(F_l, U_j) = 1 \}. \quad (\text{A.6})$$

Auf identische Weise lässt sich der durch die Technologien theoretisch erreichbare Reifegrad auf die Ebene der Szenarien projizieren. Der minimale Reifegrad eines adjazenten Use Cases bestimmt den maximal erreichbaren Reifegrad des Szenarios. Entsprechend ergibt sich der theoretisch erreichbare Reifegrad für die Ebene der Szenarien zu:

$$\mathbf{TRL}_{\text{theo}}^S(S_i, t_k) = \min_{\forall U_j \in U} \{ \mathbf{TRL}_{\text{theo}}^U(U_j, t_k) \mid {}^U\mathbf{A}_S(U_j, S_i) = 1 \}. \quad (\text{A.7})$$

Die Matrix gibt an, welcher Reifegrad für ein Szenario  $S_i$  zu welchem Zeitpunkt  $t_k$  durch die Technologieebene erreicht werden kann. Durch einen Abgleich lässt sich der Handlungsbedarf auf der Szenarioebene in Bezug auf die Use Cases bestimmen:

$$\mathbf{NFA}_{\text{tech|theo}}^S(S, t) = \mathbf{TRL}_{\text{gef}}^S(S, t) - \mathbf{TRL}_{\text{theo}}^S(S, t). \quad (\text{A.8})$$

Die Bestimmung des monetären Handlungsbedarfs für den Anwendungsfall, dass für ein Szenario kein adjazentes Konzept im TFG definiert ist, stellt die Bewertung vor eine Herausforderung. Im Rahmen der theoretischen Wirtschaftlichkeit (vgl. Abschnitt 5.4.2) wird aufgezeigt, dass eine Bewertung nicht pauschal durch die Technologiebetrachtung erfolgen kann, da eine Kosten-

bildung erst bei konzeptspezifischer Anwendung der Technologien sinnvoll ist. Somit ist auch die Bestimmung des Handlungsbedarfs nicht allgemeingültig abbildbar und es wird auf eine individuelle Betrachtung durch Neubildung eines Konzepts zurückgegriffen. Hierbei werden ein neues Konzept in den TFG eingefügt und die entsprechenden Technologien ausgewählt. Liegen die Kostenabschätzungen für dieses Konzept oberhalb der Szenarioanforderungen, entsteht ein entsprechender Handlungsbedarf, der in einer Kostenreduktion der eingesetzten Technologien oder einem Technologiewechsel auf Seiten des Konzepts resultieren kann. Als Ergebnis der Handlungsbedarfsuntersuchung können die Szenarien bestimmt werden, bei denen eine Nichterfüllung der gesetzten Anforderungen vorliegt. Um die Handlungsbedarfe in ihrer Bedeutung zu ordnen, folgt im nächsten Schritt die Priorisierung.

Die Priorisierung baut auf den Relevanzen und Abhängigkeiten der Szenarien auf. Durch die ebenenweise Betrachtung der Relevanz- und Abhängigkeitsbewertung wird eine vergleichbare Bewertungsgröße geschaffen. Ein hoher Wert bei der Abhängigkeit von der Konzeptebene  $Dep_K^S(S)$  spricht dafür, dass potenziell viele Konzepte zur Umsetzung des Szenarios zur Verfügung stehen, und ist positiv zu sehen. Eine hohe Abhängigkeit von den Use Cases bedeutet einen potenziell hohen Aufwand für die Umsetzung und ist kritisch zu betrachten. Die Priorisierung der Szenarien erfolgt auf Grundlage der Relevanzmatrix  $REL^S(S, t)$  und der Abhängigkeitsmatrix  $Dep_U^S(S)$  als Ausdruck für die Abhängigkeit der Szenarien von den Use Cases. Die Abhängigkeit von der Konzeptebene kann in einer Entscheidungssituation als Ergänzung herangezogen werden, wird im Rahmen der Priorisierung jedoch nicht weiter berücksichtigt.

Auf Grundlage der Relevanz- und Abhängigkeitsmatrizen kann in Anlehnung an die Priorisierungslogik (vgl. Tabelle 5.5) die Priorisierung der Szenarien erfolgen:

$$\mathbf{Prio}^S(S_i, t_k) = \begin{cases} 4, & \text{falls } \mathbf{REL}^S(S_i, t_k) \geq \overline{\mathbf{REL}}^S(t_k) \cap Dep_U^S(S_i) \geq \overline{Dep}_U^S, \\ 3, & \text{falls } \mathbf{REL}^S(S_i, t_k) \geq \overline{\mathbf{REL}}^S(t_k) \cap Dep_U^S(S_i) < \overline{Dep}_U^S, \\ 2, & \text{falls } \mathbf{REL}^S(S_i, t_k) < \overline{\mathbf{REL}}^S(t_k) \cap Dep_U^S(S_i) \geq \overline{Dep}_U^S, \\ 1, & \text{falls } \mathbf{REL}^S(S_i, t_k) < \overline{\mathbf{REL}}^S(t_k) \cap Dep_U^S(S_i) < \overline{Dep}_U^S. \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

Die Matrix  $\mathbf{Prio}^S(S, t)$  mit der Ordnung  $n_S \times t$  enthält die Gewichtung der Szenarien auf einer Skala von eins bis vier nach der Priorisierungslogik. Somit lässt sich der Handlungsbedarf entsprechend den Abhängigkeiten und Relevanzen der Knotenelemente bewerten. Im nächsten Schritt gilt es, dieses Vorgehen auf die Ebene der Use Cases anzuwenden.

**Use Case** Die Bestimmung des Handlungsbedarfs für die Ebene der Use Cases erfolgt analog zu den Szenarien. Jedoch lässt sich ausschließlich der technologisch orientierte Handlungsbedarf bestimmen. Eine Ableitung von monetärem Handlungsbedarf ist an dieser Stelle nicht möglich, da die Kostenforderungen lediglich auf die Ebene der Szenarien bezogen sind (vgl. Abschnitt 5.4.2). Diese Anforderungen lassen sich nicht auf die Ebene der Use Cases herunterbrechen, da eine Kostenverteilung zwischen den Use Cases individuell erfolgen muss. Ein Abgleich ist lediglich auf der Ebene der Szenarien sinnvoll. Für eine erste Kostenindikation und Abschätzung der Wirtschaftlichkeit können jedoch die konzeptseitig realisierbaren Kosten der Use Cases, definiert durch  $\mathbf{HK}_{\text{real}}^{\text{US}|\min}$ , herangezogen werden. Die Bestimmung dieser Kostenart ist in Anhang A.14 beschrieben.

Bei der Bestimmung des technologischen Handlungsbedarfs ist wiederum zu unterscheiden, ob für den untersuchten Use Case ein adjazentes Konzept besteht und der Handlungsbedarf auf die Konzept- oder auf die Technologieebene bezogen ist. Zunächst soll der Fall betrachtet werden, dass innerhalb des TFG für den Use Case ein adjazentes Konzept existiert.

Durch den Tensor  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{US}}(U, S, t)$  ist bekannt, welche Anforderungen an den Technologiereifegrad aus den Szenarien an die Use Cases gestellt werden. In Anlehnung an die Bestimmung des realistischen Reifegrads der Szenarien durch die Konzepte (vgl. Gleichung A.3) lässt sich der realistische Reifegrad für die Use Cases bestimmen:

$$\mathbf{TRL}_{\text{real}}^{\text{U}}(U_j, t_k) = \max_{\forall K_o \in K} \left\{ \mathbf{TRL}_{\text{real}}^{\text{K}}(K_o, t_k) \mid {}^{\text{K}}\mathbf{A}_{\text{U}}(K_o, U_j) = 1 \right\}. \quad (\text{A.10})$$

Durch Bildung der Differenz lässt sich ein Ausdruck für den konzeptorientierten, technologischen Handlungsbedarf für die Ebene der Use Cases formulieren:

$$\mathbf{NFA}_{\text{tech|real}}^{\text{US}}(U, S_i, t) = \left\{ \mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{US}}(U, S_i, t) - \mathbf{TRL}_{\text{real}}^{\text{U}}(U, t) \right\} \forall S. \quad (\text{A.11})$$

Durch den Tensor kann eine Aussage darüber getroffen werden, in welchen Use Cases und zu welchem Zeitpunkt die Reifegradanforderungen der Szenarien nicht durch die Konzepte erfüllt werden können. Ein entsprechender Handlungsbedarf besteht für den Use Case  $U_j$  zum Zeitpunkt  $t_k$ , falls der geforderte Reifegrad eines Szenarios unterschritten wird:

$$\min_{\forall S_i \in S} \mathbf{NFA}_{\text{tech|real}}^{\text{US}}(U_j, S_i, t_k) > 0. \quad (\text{A.12})$$

Um einen Vergleich der Use Cases untereinander zu ermöglichen, ist insbesondere die maximale Differenz zwischen gefordertem und technologisch realisierbarem Reifegrad von Interesse. Durch diese Differenz wird ausgedrückt, um welchen Reifegrad ein Use Case konzeptseitig gesteigert werden müsste, um den Anforderungen aller adjazenten Szenarien gerecht zu werden. Durch

$$\mathbf{NFA}_{\text{tech|real}}^{\text{U|max}}(U, t) = \max_{\forall S_i \in S} \mathbf{NFA}_{\text{tech|real}}^{\text{US}}(U, S_i, t) \quad (\text{A.13})$$

lässt sich bestimmen, welche maximale Reifegraddifferenz für einen Use Case  $U_j$  zu einem Zeitpunkt  $t_k$  besteht. Somit wird das Anforderungskollektiv der Szenarien für jeden Use Case in einem Kennwert zusammengefasst.

Der zweite Fall, den es auf der Ebene der Use Cases zu untersuchen gilt, ist die Bestimmung des Handlungsbedarfs in Bezug auf die Technologieebene. Ist durch den TFG kein adjazentes Konzept für einen Use Case definiert, kann der Abgleich von gefordertem und realisiertem Reifegrad nur durch die Technologieebene erfolgen. Im Rahmen der Szenariobewertung ist bereits der theoretisch erreichbare Reifegrad für die Ebene der Use Cases (vgl. Gleichung A.6) durch die Matrix  $\mathbf{TRL}_{\text{theo}}^{\text{U}}(U, t)$  bestimmt. Der Handlungsbedarf ergibt sich analog zum bisherigen Vorgehen durch die Bildung der Differenzmatrix über die Gesamtmenge aller Szenarien. Gleichung A.14 beschreibt die Berechnung.

$$\mathbf{NFA}_{\text{tech|theo}}^{\text{US}}(U, S_i, t) = \left\{ \mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{US}}(U, S_i, t) - \mathbf{TRL}_{\text{theo}}^{\text{U}}(U, t) \right\} \forall S \quad (\text{A.14})$$

Aus Gleichung A.14 lässt sich bestimmen, welcher Use Case  $U_j$  in welchem Szenario  $S_i$  zu welchem Zeitpunkt  $t_k$  nicht erfüllt werden kann. In diesem Fall gilt  $\mathbf{NFA}_{\text{tech|theo}}^{\text{US}}(U_j, S_i, t_k) > 0$  und es entsteht ein entsprechender Handlungsbedarf für diesen Use Case, da die Szenarioanforderungen nicht erfüllt werden können. Durch Betrachtung der adjazenten Funktionen für den Use Case kann bestimmt werden, für welche Funktion eine Steigerung des Reifegrads nötig ist. Diese Betrachtung findet im Rahmen des nächsten Abschnitts statt. Analog zu Gleichung A.13 kann auch für den theoretischen Handlungsbedarf die maximale Reifegraddifferenz über alle Szenarien bestimmt werden. Entsprechend ergibt sich das theoretische Anforderungskollektiv aller Szenarien für die Use Cases zu:

$$\mathbf{NFA}_{\text{tech|theo}}^{\text{U|max}}(U, t) = \max_{\forall S_i \in S} \mathbf{NFA}_{\text{tech|theo}}^{\text{US}}(U, S_i, t). \quad (\text{A.15})$$

Nachdem der technologische Handlungsbedarf bestimmt ist, gilt es diesen entsprechend der Relevanz und Abhängigkeit der Knotenelemente zu priorisieren. Die Priorisierung erfolgt analog zum Vorgehen der Szenarien (vgl. Gleichung A.9). Auf Grundlage der kumulierten Relevanz  $\mathbf{REL}_{\text{kum}}^{\text{U}}$  und Abhängigkeit  $\text{Dep}_{\text{F}}^{\text{U}}(U)$  wird die Bedeutung der Use Cases zum Zeitpunkt  $t_k$  ermittelt ( $\mathbf{Prio}^{\text{U}}(U_j, t_k)$ ). Somit kann der Handlungsbedarf gewichtet und die Bearbeitung besonders relevanter Defizite priorisiert werden. Neben der Priorisierung wird ergänzend die Abhängigkeit von der Ebene der Konzepte betrachtet. Besondere Bedeutung haben an dieser Stelle die Use Cases, die kein adjazentes Konzept aufweisen. Dies deutet auf einen *konzeptionellen Whitespot* hin. Unter einem Whitespot wird ein Bereich innerhalb des Technologiefeldgraphen verstanden, der noch nicht mit einer Technologie oder einem Konzept belegt ist, jedoch relevant für die Weiterentwicklung ist. Dieser Whitespot kann in Abhängigkeit der Priorität des Use Cases die Ausgangsbasis für eine neue Konzeptentwicklung sein. Somit wird an dieser Stelle systematisch das konzeptionelle Defizit des Technologiefelds aufgezeigt. Im nächsten Schritt folgt die Bewertung der Funktionsebene.

**Funktion** Die Bestimmung des Handlungsbedarfs auf der Funktionsebene beschränkt sich auf den technologischen Handlungsbedarf durch Abgleich geforderter und realisierbarer Technologiereifegrade. Eine monetäre Bewertung auf Funktionsebene ist nicht möglich, da zum einen keine Zielkosten aus den Szenarien abgeleitet werden können. Zum anderen ist die Bestimmung der realistischen Kosten für eine Funktionsrealisierung nicht möglich, da diese von der Funktionsausprägung bzw. vom Szenario abhängig sind. Beispielsweise unterscheiden sich die Kosten für die Funktion „Energie bereitstellen“. Für ein Elektrofahrzeug wären diese Kosten, aufgrund des größeren Bedarfs an Batteriekapazität, deutlich höher anzusetzen als für einen mobilen Roboter. Somit ist eine pauschale Kostenabschätzung nicht zulässig. [44, 138]

Der technologische Handlungsbedarf ergibt sich durch den Abgleich der Szenarioanforderungen an die Funktion mit den erreichbaren Reifegraden durch die Technologien. Die Bewertung erfolgt somit analog zur Ebene der Szenarien, unterscheidet sich jedoch in der Interpretation. Auf der Szenarioebene steht die Fragestellung, welcher Handlungsbedarf zur Realisierung eines Szenarios besteht, im Vordergrund. Hingegen wird auf der Funktionsebene bestimmt, welche Funktion in welchem Szenario ein Defizit aufweist. Diese Bewertung ist bei der Analyse des TFG von Bedeutung, da hierdurch technologische Whitespots identifiziert werden und insbesondere der bestehende Handlungsbedarf für eine Funktionsentwicklung abgeleitet wird. Durch die Matrix



$\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{FS}}(F, S, t)$  ist bekannt, welche Anforderungen aus den Szenarien an die Funktionen gestellt werden. Durch einen Abgleich mit der Matrix, die den erreichbaren Reifegrad der Funktionen definiert ( $\mathbf{TRL}_{\text{theo}}^{\text{F}}(F, t)$ ), kann bestimmt werden, welche Funktionen in welchen Szenarien als umsetzbar zu betrachten sind (vgl. Abschnitt 5.4.1). Der Handlungsbedarf lässt sich bestimmen zu:

$$\mathbf{NFA}_{\text{tech|theo}}^{\text{FS}}(F, S_i, t) = \left\{ \mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{FS}}(F, S_i, t) - \mathbf{TRL}_{\text{theo}}^{\text{F}}(F, t) \right\} \forall S. \quad (\text{A.16})$$

Durch Gleichung A.16 ist der Handlungsbedarf in Abhängigkeit von Funktion und Szenario gegeben. Aus dieser Matrix können zwei Arten von Aussagen und der entsprechende Handlungsbedarf abgeleitet werden. Zum einen lässt sich für jede der Funktionen des Graphen bestimmen, für welche Anzahl an Szenarien  $n$  die Reifegradanforderungen nicht erfüllt werden können. Für diesen Fall gilt:

$$\mathbf{NFA}_{\text{tech|theo}}^{\text{FS}}(F, S, t) > 0. \quad (\text{A.17})$$

Durch die Differenzmatrix lässt sich auch eine Aussage darüber treffen, um welche Anzahl an Reifegradstufen eine Funktion gesteigert werden muss. Der entsprechende Handlungsbedarf kann auch quantitativ beschrieben werden. Ferner kann durch die Betrachtung der adjazenten Technologien bestimmt werden, auf welche Technologien das Defizit in der Reife zurückzuführen ist. Um einen vergleichbaren Kennwert für die Funktionsebene zu erhalten, wird für jede Funktion der maximale Handlungsbedarf über alle Szenarien ermittelt. Dieser Kennwert spiegelt das Anforderungskollektiv aller einsatzrelevanten Szenarien wider und lässt sich durch

$$\mathbf{NFA}_{\text{tech|theo}}^{\text{F|max}}(F, t) = \max_{\forall S_i \in S} \mathbf{NFA}_{\text{tech|theo}}^{\text{FS}}(F, S_i, t) \quad (\text{A.18})$$

beschreiben. Mittels der Matrix  $\mathbf{NFA}_{\text{tech|theo}}^{\text{F|max}}(F, t)$  wird der maximale Handlungsbedarf für eine Funktion  $F_l$  zum Zeitpunkt  $t_k$  definiert.

Ergänzend zum Handlungsbedarf gilt es, die Priorisierung vorzunehmen. Die Priorisierung auf der Funktionsebene unterscheidet sich von der bisherigen Vorgehensweise. Durch die Relevanzmatrizen  $\mathbf{REL}_{\text{kum}}^{\text{F}}(F, t)$  ist die Bedeutung der Funktionen für die Umsetzung von Use Cases und Szenarien unter Berücksichtigung der Szenariorelevanz beschrieben. Die Anzahl der Technologien, die für eine Umsetzung der Funktion potenziell in Frage kommen, ist durch  $\text{Dep}^{\text{F}}(F)$  definiert. Entsprechend folgt an dieser Stelle die Priorisierung einer inversen Logik. Besitzt eine Funktion eine hohe Relevanz und stehen wenige Technologien zur Umsetzung zur Verfügung, gilt die Funktion als kritisches Element. Ist hingegen die Relevanz gering und die Anzahl adjazenter Technologien hoch, kann das Knotenelement als isoliert betrachtet werden. Die Priorisierungslogik folgt dem bekannten Schema:

$$\mathbf{Prio}^{\text{F}}(F_l, t_k) = \begin{cases} 4, & \text{falls } \mathbf{REL}_{\text{kum}}^{\text{F}}(F_l, t_k) \geq \overline{\mathbf{REL}}^{\text{F}}(t_k) \cap \text{Dep}^{\text{F}}(F_l) \leq \overline{\text{Dep}}^{\text{F}}, \\ 3, & \text{falls } \mathbf{REL}_{\text{kum}}^{\text{F}}(F_l, t_k) \geq \overline{\mathbf{REL}}^{\text{F}}(t_k) \cap \text{Dep}^{\text{F}}(F_l) > \overline{\text{Dep}}^{\text{F}}, \\ 2, & \text{falls } \mathbf{REL}_{\text{kum}}^{\text{F}}(F_l, t_k) < \overline{\mathbf{REL}}^{\text{F}}(t_k) \cap \text{Dep}^{\text{F}}(F_l) \leq \overline{\text{Dep}}^{\text{F}}, \\ 1, & \text{falls } \mathbf{REL}_{\text{kum}}^{\text{F}}(F_l, t_k) < \overline{\mathbf{REL}}^{\text{F}}(t_k) \cap \text{Dep}^{\text{F}}(F_l) > \overline{\text{Dep}}^{\text{F}}. \end{cases} \quad (\text{A.19})$$

Hierbei beschreibt ein Matrixeintrag von 4 eine sehr hohe Priorität und 1 eine geringe Priorität für die Funktion  $F_l$  zum Zeitpunkt  $t_k$ . Entsprechend der Priorisierungsmatrix können die Hand-

lungsbedarfe gewichtet und so bestimmt werden, welcher Funktionsentwicklung eine besondere Bedeutung zukommt und bevorzugt werden sollte.

**Technologie** Auf der Ebene der Technologien lässt sich wie zuvor ausschließlich der technologische Handlungsbedarf ermitteln, da die Kostenbestimmung für eine Technologie applikationsspezifisch erfolgen muss und ein pauschaler Abgleich mit den Szenarioanforderungen nicht realisierbar ist (vgl. Abschnitt 5.4.2). Durch den TFG wird jedoch ein Werkzeug bereitgestellt, das zur Unterstützung der Kostenabschätzung herangezogen werden kann.

Zur Bestimmung des technologischen Handlungsbedarfs werden im ersten Schritt die Reifegradanforderungen der Szenarien auf die Technologieebene projiziert. Durch  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{FS}}(F, S, t)$  sind die Anforderungen der Szenarien an die Funktionsebene bekannt. Unter Einsatz der Relationsmatrix  ${}^T\mathbf{A}_F$  lassen sich diese Reifegradanforderungen auf die Technologieebene projizieren. Dieses Vorgehen berücksichtigt jedoch nicht, dass für die Realisierung einer Funktion die Nutzung einer Technologiealternative möglich ist und kein realer Handlungsbedarf besteht. Folglich gilt es, bei der Bestimmung des Handlungsbedarfs auf der Technologieebene zu berücksichtigen, ob Alternativtechnologien für die Realisierung einer Funktion vorhanden sind und diese ein ausreichendes Reifegradniveau aufweisen. Zunächst wird der geforderte Reifegrad für die Technologien in Abhängigkeit der Szenarien bestimmt. Hierbei werden die Anforderungen der Funktionen nur berücksichtigt, wenn ein Handlungsbedarf für die entsprechende Funktion besteht und die Technologie eine inzidente Kante zur jeweiligen Funktion aufweist:

$$\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{TS}}(T_m, S_i, t_k) = \max_{\forall F_l \in F} \left\{ \mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{FS}}(F_l, S_i, t_k) \mid {}^T\mathbf{A}_F(T_m, F_l) = 1, \mathbf{NFA}_{\text{tech|theo}}^{\text{FS}}(F_l, S_i, t_k) > 0 \right\}. \quad (\text{A.20})$$

Die Matrix  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{TS}}(T, S, t)$  gibt an, welche Reifegradanforderungen an die Technologien durch einen Handlungsbedarf auf der Funktionsebene resultieren. Der Abgleich dieser geforderten Reifegrade mit den realistischen Reifegraden der Technologien  $\mathbf{TRL}_{\text{real}}^{\text{T}}(T, t)$ , welche durch die Steckbriefe definiert sind, liefert entsprechend den Handlungsbedarf:

$$\mathbf{NFA}_{\text{tech|theo}}^{\text{TS}}(T, S_i, t) = \left\{ \mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{TS}}(T, S_i, t) - \mathbf{TRL}_{\text{real}}^{\text{T}}(T, t) \right\} \forall S. \quad (\text{A.21})$$

Durch  $\mathbf{NFA}_{\text{tech|theo}}^{\text{TS}}(T, S, t)$  wird beschrieben, welche Differenz zwischen dem realistischen Reifegrad der Technologie  $T_m$  und dem geforderten Reifegrad aus dem Szenario  $S_i$  zum Zeitpunkt  $t_k$  besteht. Entsprechend entsteht ein Handlungsbedarf, falls  $\mathbf{NFA}_{\text{tech|theo}}^{\text{TS}}(T, S, t) > 0$  gilt. Analog zur Bestimmung des maximalen Handlungsbedarfs für die übergeordneten Ebenen des TFG lässt sich auch für die Ebene der Funktionen eine entsprechende Betrachtung vornehmen. Durch

$$\mathbf{NFA}_{\text{tech|theo}}^{\text{T|max}}(T, t) = \max_{\forall S_i \in S} \mathbf{NFA}_{\text{tech|theo}}^{\text{TS}}(T, S_i, t) \quad (\text{A.22})$$

wird das Anforderungskollektiv der Szenarien für jede Technologie zusammengefasst. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass keine Betrachtung von Technologiealternativen stattfindet. In einer Technologieentwicklung kann auf Grundlage des geringsten Handlungsbedarfs eine Technologie zur Funktionsrealisierung ausgewählt werden. Somit entfallen ggf. für die übrigen adjazenten

Technologien dieser Funktion die szenarioseitig gesetzten Anforderungen und der Handlungsbedarf für die Funktionen reduziert sich. Somit ist es u. U. nicht notwendig, für alle Technologien den durch  $\mathbf{NFA}_{\text{tech|theo}}^{\text{T|max}}(T, t)$  definierten Handlungsbedarf umzusetzen. Der Kennwert muss entsprechend immer unter Berücksichtigung des letztendlichen Technologieentscheids betrachtet werden. Ergänzend zur Bestimmung des Handlungsbedarfs folgt die Priorisierung.

Bei der Priorisierung auf Technologieebene kann nicht auf das bisherige Bewertungsverfahren zurückgegriffen werden. Durch das Relationsmodell besitzen Technologieknoten lediglich ausgehende Kanten. Aus diesem Grund kann die Abhängigkeit nicht quantitativ beschrieben werden. Es ist lediglich durch die Klassifizierungsattribute der Steckbriefe eine indirekte Bewertung der Abhängigkeit möglich. Für die Priorisierung werden an dieser Stelle daher die Relevanzbewertungen (vgl. Abschnitt 5.4.3) herangezogen. Durch die Bewertungsmatrix  $\mathbf{REL}_{\text{kum}}^{\text{T}}(T, t)$  ist die kumulierte Relevanz der Technologie bekannt. Diese kann bei der Bewertung des Handlungsbedarfs genutzt werden, um eine Aussage über die Bedeutung der Technologie für das Technologiefeld abzuleiten. In Anlehnung an die bisherige Priorisierungslogik wird die kumulierte Relevanz ins Verhältnis zum Mittelwert der kumulierten Relevanzen  $\overline{\mathbf{REL}}^{\text{T}}(t)$  gesetzt.

Im Unterschied hierzu ist durch  $\mathbf{REL}_{\text{real}}^{\text{T}}(T, t)$  die Relevanz in Bezug auf die Konzeptrealisierung beschrieben. Die Technologien, die eine hohe Bewertung aufweisen, insbesondere für die Umsetzung von unternehmensinternen Konzepten, sind im Rahmen der strategischen Technologieplanung als Kernkompetenz des Unternehmens zu priorisieren, um die Entwicklung der Konzepte sicherzustellen. Entsprechend sind diese auch in der Priorisierung zu berücksichtigen. Für die Priorisierung erfolgt daher auch ein Abgleich zwischen der konzeptbezogenen Relevanz der Technologien mit dem Mittelwert  $\overline{\mathbf{REL}}_{\text{real}}^{\text{T}}(t)$ . Es ergibt sich die folgende Priorisierungslogik für die Ebene der Technologien:

$$\mathbf{Prio}^{\text{T}}(T_m, t_k) = \begin{cases} 4, & \text{falls } \mathbf{REL}_{\text{kum}}^{\text{T}}(T_m, t_k) \geq \overline{\mathbf{REL}}^{\text{T}}(t_k) \cap \mathbf{REL}_{\text{real}}^{\text{T}}(T_m, t_k) \geq \overline{\mathbf{REL}}_{\text{real}}^{\text{T}}(t_k), \\ 3, & \text{falls } \mathbf{REL}_{\text{kum}}^{\text{T}}(T_m, t_k) \geq \overline{\mathbf{REL}}^{\text{T}}(t_k) \cap \mathbf{REL}_{\text{real}}^{\text{T}}(T_m, t_k) < \overline{\mathbf{REL}}_{\text{real}}^{\text{T}}(t_k), \\ 2, & \text{falls } \mathbf{REL}_{\text{kum}}^{\text{T}}(T_m, t_k) < \overline{\mathbf{REL}}^{\text{T}}(t_k) \cap \mathbf{REL}_{\text{real}}^{\text{T}}(T_m, t_k) \geq \overline{\mathbf{REL}}_{\text{real}}^{\text{T}}(t_k), \\ 1, & \text{falls } \mathbf{REL}_{\text{kum}}^{\text{T}}(T_m, t_k) < \overline{\mathbf{REL}}^{\text{T}}(t_k) \cap \mathbf{REL}_{\text{real}}^{\text{T}}(T_m, t_k) < \overline{\mathbf{REL}}_{\text{real}}^{\text{T}}(t_k). \end{cases} \quad (\text{A.23})$$

Nach dieser Logik besitzen Technologien mit einer hohen Relevanz für die Funktions- und Konzeptebene eine hohe Priorisierung, Technologien mit einer geringen Relevanz für Funktions- und Konzeptebene hingegen eine geringe Priorisierung.

**Konzept** Für die Ebene der Konzepte folgt die Bestimmung des Handlungsbedarfs und die Priorisierung wieder nach dem bekannten Vorgehen. Hierbei lässt sich sowohl der technologische als auch der monetäre Handlungsbedarf bestimmen.  $\mathbf{TRL}_{\text{real}}^{\text{K}}(K, t)$  definiert den realisierbaren Reifegrad für die Konzepte, den es mit dem geforderten Reifegrad der Szenarien abzugleichen gilt. Durch  $\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{S}}(S, t)$  und die Relationsmatrix  ${}^{\text{K}}\mathbf{A}_{\text{S}}$  lässt sich der geforderte Technologiereifegrad auf der Ebene der Konzepte berechnen:

$$\mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{KS}}(K_o, S_i, t_k) = \left\{ \mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{S}}(S_i, t_k) \mid {}^{\text{K}}\mathbf{A}_{\text{S}}(K_o, S_i) = 1 \right\}. \quad (\text{A.24})$$

Durch das Bewertungstupel wird ausgedrückt, welcher Reifegrad durch das Szenario  $S_i$  zum Zeitpunkt  $t_k$  für das Konzept  $K_o$  gefordert wird. Aufbauend ergibt sich der technologische Handlungsbedarf für die Konzepte durch Bildung der elementweisen Differenzen:

$$\mathbf{NFA}_{\text{tech|real}}^{\text{KS}}(K, S_i, t) = \left\{ \mathbf{TRL}_{\text{gef}}^{\text{KS}}(K, S_i, t) - \mathbf{TRL}_{\text{real}}^{\text{K}}(K, t) \right\} \forall S. \quad (\text{A.25})$$

Durch  $\mathbf{NFA}_{\text{tech|real}}^{\text{KS}}(K, S, t)$  lässt sich bestimmen, welches Konzept die Anforderungen der Szenarien zu welchem Zeitpunkt nicht erfüllt, und entsprechend durch die Höhe der Technologiedifferenz der Handlungsbedarf quantifizieren. Um einen vergleichbaren Kennwert für die Bewertung der Konzepte zu bestimmen, wird der maximale, technologische Handlungsbedarf bestimmt:

$$\mathbf{NFA}_{\text{tech|real}}^{\text{K|max}}(K, t) = \max_{\forall S_i \in S} \mathbf{NFA}_{\text{tech|real}}^{\text{KS}}(K, S_i, t). \quad (\text{A.26})$$

Die Matrix  $\mathbf{NFA}_{\text{tech|real}}^{\text{K|max}}(K, t)$  gibt an, welche maximale Differenz zwischen dem Reifegrad der Konzepte und dem Reifegrad der adjazenten Szenarien besteht und kann als Zielgröße für die Weiterentwicklung der Konzepte und zur Definition von Meilensteinen im Rahmen einer Technologieroadmap (vgl. Abschnitt 3.4.1) herangezogen werden.

Die Bestimmung des monetären Handlungsbedarfs erfolgt analog. Durch die Matrix  $\mathbf{HK}_{\text{real}}^{\text{K}}(K, t)$  ist bekannt, welche Kostenentwicklung für die Konzepte zu erwarten ist. Die geforderten Kosten auf Seiten der Szenarien sind durch  $\mathbf{HK}_{\text{gef}}^{\text{S}}(S, t)$  definiert. Unter Zuhilfenahme der Relationsmatrix zwischen der Konzept- und der Szenarioebene  ${}^{\text{K}}\mathbf{A}_{\text{S}}$  werden diese ebenfalls auf die Konzeptebene projiziert:

$$\mathbf{HK}_{\text{gef}}^{\text{KS}}(K_o, S_i, t_k) = \left\{ \mathbf{HK}_{\text{gef}}^{\text{S}}(S_i, t_k) \mid {}^{\text{K}}\mathbf{A}_{\text{S}}(K_o, S_i) = 1 \right\}. \quad (\text{A.27})$$

Der Tensor beschreibt die Kostenanforderungen des Szenarios  $S_i$  an das Konzept  $K_o$  zum Zeitpunkt  $t_k$ . In letzter Instanz lässt sich der monetäre Handlungsbedarf bestimmen zu:

$$\mathbf{NFA}_{\text{mon|real}}^{\text{KS}}(K_o, S_i, t_k) = \left\{ \mathbf{HK}_{\text{real}}^{\text{K}}(K_o, t_k) - \mathbf{HK}_{\text{gef}}^{\text{KS}}(K_o, S_i, t_k) \right\} \forall S. \quad (\text{A.28})$$

Durch Gleichung A.28 wird beschrieben, welche Differenz zwischen den Anforderungen des Szenarios  $S_i$  zum Zeitpunkt  $t_k$  für das Konzept  $K_o$  besteht. Somit lässt sich für  $\mathbf{NFA}_{\text{mon|real}}^{\text{KS}}(K, S, t) > 0$  bestimmen, welche Kostenreduktion auf Seiten der Konzepte zur Realisierung der Szenarien angestrebt wird. Analog zu Gleichung A.26 lässt sich auch für den monetären Handlungsbedarf der Maximalwert über alle Szenarien bilden. Die Matrix

$$\mathbf{NFA}_{\text{mon|real}}^{\text{K|max}}(K, t) = \max_{\forall S_i \in S} \mathbf{NFA}_{\text{mon|real}}^{\text{KS}}(K, S_i, t) \quad (\text{A.29})$$

definiert den maximalen monetären Handlungsbedarf über die adjazenten Szenarien des Konzepts  $K_o$  zum Zeitpunkt  $t_k$  und drückt das monetäre Anforderungskollektiv des Technologiefelds aus. Diese Bewertung bildet den Abschluss der Handlungsbedarfsbestimmung und es folgt die entsprechende Priorisierung.

Um die technologischen und monetären Handlungsbedarfe zu gewichten, wird auf Grundlage von Abhängigkeit  $\text{Dep}^{\text{K}}(K)$  und Relevanz der Konzepte  $\mathbf{REL}_{\text{kum}}^{\text{K}}(K, t)$  die Priorisierung vorgenommen. Die Priorisierung folgt dem bekannten Schema. Abhängigkeiten und Relevanzen werden

nach der Priorisierungslogik (vgl. Tabelle 5.5) durch Vergleich mit den Mittelwerten (vgl. Gleichung 5.38 und Gleichung 5.39) in die Matrix  $\mathbf{Prio}^K(K, t)$  überführt. Konzepte, die eine hohe Relevanz für die Szenarien besitzen und gleichzeitig eine große Zahl adjazenter Technologien aufweisen, stellen die kritischen Knotenelemente des TFG dar. Entsprechend resultieren geringe Relevanzen und Abhängigkeiten in einer niedrigen Priorisierung.

## A.16 Übersicht der Bewertungsgrößen

**Tabelle A.6:** Übersicht der Bewertungsgrößen der Szenarien

Ebene	Kategorie	Bewertungsmatrix	Beschreibung
Szenario	Reifegrad	$\mathbf{TRL}_{gef}^S(S, t)$	geforderter Reifegrad der Szenarien in Abhängigkeit der Zeit
		$\mathbf{TRL}_{real}^S(S, t)$	realer Reifegrad der Szenarien in Abhängigkeit der Zeit
		$\mathbf{TRL}_{theo}^S(S, t)$	theoretischer Reifegrad der Szenarien in Abhängigkeit der Zeit
	Kosten	$\mathbf{HK}_{gef}^S(S)$	geforderte Kosten für die Szenarien $S$
		$\mathbf{HK}_{gef}^S(S, t)$	geforderte Kosten für Szenario $S$ in Abhängigkeit der Zeit
		$\mathbf{HK}_{real}^{SK}(S, K, t)$	reale Kosten für die Szenarien $S$ in Abhängigkeit des Konzepts
		$\mathbf{HK}_{real}^{S min}(S, t)$	minimal realisierbare Kosten für die Szenarien $S$
	Relevanz	$\mathbf{Rel}^S(S)$	Relevanz des Szenario $S$ .
		$\mathbf{REL}^S(S, t)$	Relevanz des Szenario $S$ in Abhängigkeit der Zeit
		$\overline{\mathbf{REL}}^S(t)$	Mittelwert der Relevanz in Abhängigkeit der Zeit
	Abhängigkeit	$\mathbf{Dep}_U^S(S)$	Abhängigkeit des Szenario $S$ von den UseCases
		$\mathbf{Dep}_K^S(S)$	Abhängigkeit des Szenario $S$ von den Konzepten
		$\overline{\mathbf{Dep}}_U^S$	Mittelwert der Abhängigkeiten von den UseCases
		$\overline{\mathbf{Dep}}_K^S$	Mittelwert der Abhängigkeiten von den Konzepten
	Handlungsbedarf	$\mathbf{NFA}_{tech real}^S(S, t)$	technologischer Handlungsbedarf für $S$
		$\mathbf{NFA}_{tech theo}^S(S, t)$	technologischer Handlungsbedarf für $S$
		$\mathbf{NFA}_{mon real}^S(S, t)$	monetärer Handlungsbedarf für $S$
	Priorität	$\mathbf{Prio}^S(S, t)$	Priorität des Szenarios $S$

**Tabelle A.7:** Übersicht der Bewertungsgrößen der Use Cases

Ebene	Kategorie	Bewertungsmatrix	Beschreibung
Use Case	Reifegrad	$\mathbf{TRL}_{gef}^{US}(U, S, t)$	geforderte Technologiereifegrad der Use Cases in Abhängigkeit von Szenario und Zeit
		$\mathbf{TRL}_{real}^U(U, t)$	realistischer Reifegrad in Abhängigkeit der Zeit
		$\mathbf{TRL}_{theo}^U(U, t)$	theoretischer Reifegrad in Abhängigkeit der Zeit
	Kosten	$\mathbf{HK}_{real}^{UK}(U, K, t)$	realistische Kosten in Abhängigkeit von Konzept und Zeit
		$\mathbf{HK}_{real}^{US min}(U, S, t)$	konzeptseitig minimale Kosten in Abhängigkeit von Szenario und Zeit
	Relevanz	$\mathbf{REL}^U(U, t)$	einfache Relevanz in Abhängigkeit der Zeit.
		$\mathbf{REL}_{kum}^U(U, t)$	kumulierte Relevanz in Abhängigkeit der Zeit.
		$\overline{\mathbf{REL}}^U(t)$	Mittelwert der Relevanzen in Abhängigkeit der Zeit.
	Abhängigkeit	$Dep_F^U(U)$	Abhängigkeit des Use Case $U$ von den Funktionen
		$Dep_K^U(U)$	Abhängigkeit des Use Case $U$ von den Konzepten
		$\overline{Dep}_F^U$	Mittelwert der Abhängigkeit von den Funktionen
		$\overline{Dep}_K^U$	Mittelwert der Abhängigkeit von den Konzepten
	Handlungsbedarf	$\mathbf{NFA}_{tech real}^{US}(U, S, t)$	technologischer Handlungsbedarf in Bezug auf die Konzepte
		$\mathbf{NFA}_{tech theo}^{US}(U, S, t)$	technologischer Handlungsbedarf in Bezug auf die Funktionen
		$\mathbf{NFA}_{tech real}^{U max}(U, t)$	maximaler technologischer Handlungsbedarf in Bezug auf die Konzepte
		$\mathbf{NFA}_{tech theo}^{U max}(U, t)$	maximaler technologischer Handlungsbedarf in Bezug auf die Funktionen
	Priorität	$\mathbf{Prio}^U(U, t)$	Priorität des Use Case $U$

**Tabelle A.8:** Übersicht der Bewertungsgrößen der Funktionen

Ebene	Kategorie	Bewertungsmatrix	Beschreibung
Funktion	Reifegrad	$\mathbf{TRL}_{gef}^{FS}(F, S, t)$	geforderte Technologiereifegrad der Funktionen in Abhängigkeit von Szenario und Zeit
		$\mathbf{TRL}_{theo}^{FT}(F, T, t)$	realer Technologiereifegrad der Funktionen in Abhängigkeit von Technologie und Zeit
		$\mathbf{TRL}_{theo}^F(F, t)$	maximaler Technologiereifegrad der Funktionen in Abhängigkeit der Zeit
	Relevanz	$\mathbf{REL}^F(F, t)$	einfache Relevanz der Funktion $F$ in Abhängigkeit der Zeit.
		$\mathbf{REL}_{kum}^F(F, t)$	kumlierte Relevanz der Funktion $F$ in Abhängigkeit der Zeit.
		$\mathbf{REL}_{norm}^F(F, t)$	normalisierte Relevanz der Funktion $F$ in Abhängigkeit der Zeit.
		$\overline{\mathbf{REL}}^F(t)$	Mittelwert der Relevanzen der Funktionen in Abhängigkeit der Zeit.
	Abhängigkeit	$Dep^F(F)$	Abhängigkeit der Funktion $F$ von den Technologien.
		$\overline{Dep}^F$	Mittelwert der Abhängigkeiten der Funktion von den Technologien.
	Handlungsbedarf	$\mathbf{NFA}_{tech theo}^{FS}(F, S, t)$	technologischer Handlungsbedarf für $F$ in Abhängigkeit des Szenarios $S$
		$\mathbf{NFA}_{tech theo}^{F max}(F, t)$	maximaler technologischer Handlungsbedarf für $F$
Priorität		$\mathbf{Prio}^F(F, t)$	Priorität der Funktion $F$



**Tabelle A.9:** Übersicht der Bewertungsgrößen der Technologien

<b>Ebene</b>	<b>Kategorie</b>	<b>Bewertungsmatrix</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>Technologie</b>	Reifegrad	$\mathbf{TRL}_{real}^T(T, t)$	realer Technologiereifegrad der Technologien in Abhängigkeit der Zeit
		$\mathbf{TRL}_{gef}^{TS}(T, S, t)$	geforderter Technologiereifegrad der Technologien in Abhängigkeit der Szenarien
	Relevanz	$\mathbf{REL}^T(T, t)$	einfache Relevanz der Technologie $T$ in Abhängigkeit der Zeit
		$\mathbf{REL}_{kum}^T(T, t)$	kumulierte Relevanz der Technologie $T$ in Abhängigkeit der Zeit
		$\mathbf{REL}_{norm}^T(T, t)$	normalisierte Relevanz der Technologie $T$ in Abhängigkeit der Zeit
		$\mathbf{REL}_{real}^T(T, t)$	reale Relevanz der Technologie $T$ in Abhängigkeit der Zeit
		$\overline{\mathbf{REL}}^T(t)$	Mittelwert der Relevanz in Abhängigkeit der Zeit
		$\overline{\mathbf{REL}}_{real}^T(t)$	Mittelwert der Relevanz in Abhängigkeit der Zeit in Bezug auf die Konzepte
	Abhängigkeit	-	nicht bestimmbar
	Handlungsbedarf	$\mathbf{NFA}_{tech theo}^{TS}(T, S, t)$	technologischer Handlungsbedarf für $T$ in Abhängigkeit des Szenarios $S$
	Handlungsbedarf	$\mathbf{NFA}_{tech theo}^{T max}(T, t)$	maximaler technologischer Handlungsbedarf für $T$
	Priorität	$\mathbf{Prio}^T(T, t)$	Priorität der Technologie $T$

**Tabelle A.10:** Übersicht der Bewertungsgrößen der Konzepte

<b>Ebene</b>	<b>Kategorie</b>	<b>Bewertungsmatrix</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>Konzept</b>	Reifegrad	$\mathbf{TRL}_{real}^K(K, t)$	realer Technologiereifegrad der Konzepte in Abhängigkeit der Zeit.
		$\mathbf{TRL}_{gef}^{KS}(K, S, t)$	geforderte Technologiereifegrad der Konzepte in Abhängigkeit der Szenarien.
	Kosten	$\mathbf{HK}_{real}^K(K, t)$	reale Kosten der Konzepte in Abhängigkeit der Zeit
		$\mathbf{HK}_{gef}^{KS}(K, S, t)$	geforderte Kosten der Konzepte in Abhängigkeit der Szenarien
Relevanz		$\mathbf{REL}^K(K, t)$	reale Relevanz des Konzept $K$ in Abhängigkeit der Zeit.
		$\mathbf{REL}_{kum}^K(K, t)$	kumulierte Relevanz des Konzept $K$ in Abhängigkeit der Zeit.
		$\mathbf{REL}_{norm}^K(K, t)$	normalisierte Relevanz des Konzept $K$ in Abhängigkeit der Zeit.
		$\overline{\mathbf{REL}}^K(t)$	Mittelwert der Relevanzen der Konzepte in Abhängigkeit der Zeit.
Abhängigkeit		$Dep^K(K)$	Abhängigkeit des Konzept $K$ von den Technologien
		$\overline{Dep}^K$	Mittelwert der Abhängigkeiten der Konzepte von den Technologien
Handlungsbedarf		$\mathbf{NFA}_{tech real}^{KS}(K, S, t)$	technologischer Handlungsbedarf für $K$ in Abhängigkeit des Szenarios $S$
		$\mathbf{NFA}_{mon real}^{KS}(K, S, t)$	monetärer Handlungsbedarf für $K$ in Abhängigkeit des Szenarios $S$
		$\mathbf{NFA}_{tech real}^{K max}(K, t)$	maximaler technologischer Handlungsbedarf für $K$
		$\mathbf{NFA}_{mon real}^{K max}(K, t)$	maximaler monetärer Handlungsbedarf für $K$
Priorität		$\mathbf{Prio}^K(K, t)$	Priorität des Konzepts $K$

## A.17 Attributzuweisung als Ergebnis der Informationsverarbeitungsphase

**Tabelle A.11:** Attributzuordnung in der Informationsverarbeitung

	Szenario	Use Case	Funktion	Technologie	Konzept
ID	x	x	x	x	x
Typ	x	x	x	x	x
Titel	x	x	x	x	x
Beschreibung	x	x		x	x
Ersteller	x	x			
Allg. Randbedingungen	x				x
Techn. Randbedingungen	x			x	x
Wirt. Randbedingungen	x			x	
Ansprechpartner				x	x
Technologieart				x	
Interne Kompetenz				x	
Technologiepotenzial				x	
Technologielebenszyklus				x	
Informationsquelle				x	x
Geforderter Reifegrad	x				
Realistischer Reifegrad				x	x
Geforderte Kosten	x				
Realistische Kosten					x
Relevanz	x				

## A.18 Attributzuweisung als Ergebnis der Informationsbewertungsphase

**Tabelle A.12:** Attributzuordnung in der Informationsbewertung

Nr	Attribut	Szenario	Use Case	Funktion	Technologie	Konzept	Statisch	Dynamisch	Datentyp	Quelle
0	Type	x	x	x	x	x	x		STRING	Steckbrief
1	DEP_prim	x	x	x		x	x		INT	Bewertungsphase
2	DEP_sec	x	x				x		INT	Bewertungsphase
3	Titel	x		x	x	x	x		STRING	Steckbrief
4	ID	x	x	x	x	x	x		INT	Steckbrief
5	Beschreibung	x	x		x	x	x		STRING	Steckbrief
6	Ersteller	x	x				x		STRING	Steckbrief
7	Allg_Randbedingungen	x					x		STRING	Steckbrief
8	Techn_Randbedingungen	x			x	x	x		STRING	Steckbrief
9	Wirt_Randbedingungen	x			x		x		STRING	Steckbrief
10	Ansprechpartner				x	x	x		STRING	Steckbrief
11	Technologieart				x		x		STRING	Steckbrief
12	Interne_Kompetenz				x		x		STRING	Steckbrief
13	Technologiepotenzial				x		x		STRING	Steckbrief
14	Technologielebenszyklus				x		x		STRING	Steckbrief
15	Informationsquelle				x	x	x		STRING	Steckbrief
16	TRL_gef	x	x	x	x	x	x	x	INT	Steckbrief/Bewertungsphase
17	TRL_real	x	x		x	x		x	INT	Steckbrief/Bewertungsphase
18	TRL_theo	x	x	x				x	INT	Bewertungsphase
19	HK_gef	x				x		x	INT	Steckbrief/Bewertungsphase
20	HK_real					x		x	INT	Steckbrief/Bewertungsphase
21	HK_real_min	x						x	INT	Bewertungsphase
22	REL	x	x	x	x	x		x	INT	Steckbrief/Bewertungsphase
23	REL_kum		x	x	x	x		x	INT	Bewertungsphase
24	REL_norm			x	x	x		x	INT	Bewertungsphase
25	REL_real				x			x	INT	Bewertungsphase
26	PRIOR								INT	Bewertungsphase
27	NFA_tech_real_max	x	x	x	x	x		x	INT	Bewertungsphase
28	NFA_tech_theo_max	x	x	x					INT	Bewertungsphase
29	NFA_mon_real_max	x		x	x	x		x	INT	Bewertungsphase

## A.19 Liste potenzieller Szenarien für das Technologiefeld ASR

**Tabelle A.13:** Liste identifizierter Szenarien

Nr.	Szenariotitel	Quelle
1	Parken und Laden (öffentlich)	Unternehmensinterne Anwendungsexperten.
2	Betriebshof der Zukunft	Unternehmensexterne Anwendungsexperten
3	Parken und Laden (privat)	Unternehmensinterne Anwendungsexperten
4	Automatisierte Werkstatt	Reparatur- und Wartungsleitfäden
5	Waschstraße 4.0	Unternehmensexterne Technologieexperten
6	Intermodaler Umstieg	Unternehmensexterne Technologieexperten
7	Gütertransport (komplex)	Unternehmensexterne Technologieexperten
8	Unterstützung alternder Bevölkerung	Unternehmensexterne Anwendungsexperten
9	Unterstützung körperlich eingeschränkter Personen	Unternehmensinterne Anwendungsexperten
10	Pannenservice	Unternehmensinterne Technologieexperten
11	Logistik	Unternehmensinterne Anwendungsexperten
12	Fahrzeuginnenreinigung	Unternehmensinterne Anwendungsexperten
13	Mieträder verteilen	Unternehmensexterne Technologieexperten
14	Umbau Fahrzeuginterieur	Unternehmensexterne Technologieexperten
15	Warenlieferung ins Auto (ggf. während der Fahrt)	Unternehmensinterne Technologieexperten
16	Kleidungswechsel im Auto	Unternehmensexterne Technologieexperten
17	Tanken während der Fahrt	Unternehmensexterne Technologieexperten
18	Multimodaler Gütertransport	Patent- und Literaturrecherche
19	Unterstützung beim Einkauf	Unternehmensinterne Technologieexperten
20	Pannensituation AMoD	Unternehmensinterne Technologieexperten

## A.20 Liste potenzieller Use Cases für das Technologiefeld ASR

**Tabelle A.14:** Liste potenzieller Use Cases Teil 1

<b>Nr.</b>	<b>Use Case Bezeichnung</b>
	<b>Service (Intervall)</b>
1	Fehlerspeicher auslesen
2	Reifen/Räder wechseln
3	Reifendruck prüfen
4	Profiltiefe prüfen
5	Beleuchtung/Richtungsanzeiger kontrollieren
6	Radlager prüfen
7	Lichtprüfung/Leuchtmittelwechsel
8	Pollenfilter wechseln
9	Luftfilter wechseln
	<b>Betriebsstoffe</b>
10	Betanken (klassisch)
11	Motoröl nachfüllen
12	Motoröl wechseln
13	ÖlfILTER wechseln
14	Getriebeöl wechseln
15	Bremsflüssigkeit nachfüllen
16	Bremsflüssigkeit wechseln
17	Kühlmittel prüfen/auffüllen
18	Wischwasser nachfüllen
19	Differentialöl wechseln
20	Klimaanlage befüllen/entlüften
	<b>Erweiterter Service</b>
21	Spur prüfen
22	Sturz prüfen
23	Einlenkverhalten prüfen
24	Abgasanlage auf Sicht prüfen
25	12V BordnetzbatteRie prüfen/tauschen
26	Scheinwerfereinstellungen korrigieren
28	Koppelstangen/Stabilager prüfen
29	Gelenkschutzhüllen prüfen
30	Kupplung tauschen
31	Hochvoltkabel auf Sicht prüfen
32	Bremsen auf Sicht prüfen
33	Motor auf Sicht prüfen
34	Hochvoltkomponenten auf Sicht prüfen (Batterie, LE, etc)

**Tabelle A.15:** Liste potenzieller Use Cases Teil 2

<b>Nr.</b>	<b>Use Case Bezeichnung</b>
<b>Fahrzeugpflege und Instandhaltung</b>	
35	Scheiben reinigen (innen)
36	Kofferraum reinigen
37	Scheiben reinigen (außen)
38	Kunststoffoberflächen reinigen
39	Sitzpolster reinigen
40	Fußraum reinigen
41	Felgen reinigen
42	Scheibenwischblätter reinigen und auswechseln
43	Motorraum reinigen
44	Fahrzeuglack konservieren und polieren
45	Chrom- und Aluminiumzierteile pflegen und reinigen
46	Gummidichtungen pflegen
47	Türschließzylinder enteisen
48	Scheiben enteisen
49	Unterbodenreinigung
50	Kameras
51	Ortsungebundene Reinigung
<b>Diverses</b>	
52	Unterlegkeil in Abrollrichtung
53	Stützbeine der Wechselbrücke aufstellen
54	Anhänger koppeln
55	Fahrzeugumbau (Sitze, Arbeitsplatz
56	Tanken während der Fahrt
57	Fahrzeug parken
58	Abfahrtskontrolle
59	Aufbauwechsel
<b>Pannensituation</b>	
60	Warndreieck aufstellen
61	Passagiere sicher aus Fahrzeug geleiten
<b>Batteriespezifisch</b>	
62	Batteriewechsel
63	Betanken(Ladestecker anstecken)
<b>Wasserstoffspezifisch</b>	
64	Betanken(Druckschlauch verbinden)
<b>spezifisch autonomes Fahrzeug</b>	
65	Sensoren reinigen

## A.21 Patentanalyse des Technologiefelds Automotive Service Robotics



**Abbildung A.2:** Patentanalyse des Technologiefelds Automotive Service Robotics





**Institut für Werkzeugmaschinen  
und Fertigungstechnik**  
der Technischen Universität  
Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder  
Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann

Langer Kamp 19 B  
D - 38106 Braunschweig  
Telefon +49(0)531 / 391-7601  
Telefax +49(0)531 / 391-5842  
E-Mail [iwf-braunschweig@tu-braunschweig.de](mailto:iwf-braunschweig@tu-braunschweig.de)  
Internet <http://www.tu-braunschweig.de/iwf>

**ISBN 978-3-8027-8361-6**